

ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА БИОЛОГИЯ

Tomsk State University Journal of Biology

Научный журнал

2026

№ 75

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере
массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия
(свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-29499 от 27 сентября 2007 г.)

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 44024

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых
должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой
степени доктора наук» Высшей аттестационной комиссии

16+



СОДЕРЖАНИЕ

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Кушнов И.Д., Темботов Р.Х., Нехаев И.О., Низамутдинов Т.И., Абакумов Е.В. Эколого-геохимическая оценка криоконитов и перигляциальных почв Приэльбрусья и Заилийского Алатау в условиях антропогенной нагрузки и дегляциации	6
--	---

БИОТЕХНОЛОГИЯ И МИКРОБИОЛОГИЯ

Архипов А.А., Котельный М.В., Громовых П.С., Трутнев Н.С. Современные способы получения бактериальной целлюлозы	42
Gerasimchuk A.L., Glukhova L.B., Sapega A.N., Erofeevskaya L.A., Marchenko E.S., Frank Y.A. Abundance and diversity of cultured microorganisms involved in the experimental biological contamination of polymer composite materials under outdoor exposure in Yakutsk	76

БОТАНИКА

Алымбаева Ж.Б., Жарникова М.А. Онтогенетическая структура и состояние ценопопуляций <i>Craniospermum subvillosum</i> (Boraginaceae) на юго-восточном побережье озера Байкал	100
Прокопьев А.С., Катаева Т.Н. Характеристика ценопопуляций <i>Aconitum barbatum</i> на границе ареала в Западной Сибири	126

ЗООЛОГИЯ

Кропачева Ю.Э. Динамика рациона бородатой неясыти <i>Strix nebulosa</i> Forster, 1772 в гнездовой период	154
--	-----

КЛЕТОЧНАЯ БИОЛОГИЯ И ГЕНЕТИКА

Рузавина О.Д., Сваровская М.Г., Колесников Н.А., Вагайцева К.В., Волкова И.А., Харьков В.Н., Степанов В.А. Анализ генетической структуры якутской популяции с помощью аутомомных и Х-хромосомных маркеров, используемых в генетической экспертизе сложных случаев родства	170
---	-----

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

Джафарова А.М., Власова Е.В. Влияние экстракта володушки золотистой (<i>Bupleurum Aureum Fisch</i>) на биохимические и гематологические параметры крови крыс при экспериментальном токсическом гепатите, вызванном тетрахлорметаном	191
---	-----

ЭКОЛОГИЯ

Черткова Е.П., Замолотчиков Д.Г., Лукашева М.А. Роль Алтайского государственного природного биосферного заповедника в экологическом мониторинге численности и заболеваемости иксодовых клещей в «малонарушенных» и «преобразованных» экосистемах	212
--	-----

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Тарасов В.В. Гнездовая находка чегравы <i>Hydroprogne caspia</i> (Pallas, 1770) в Тюменской области (Западная Сибирь)	233
---	-----

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 574.42

doi: 10.17223/19988591/75/1

Эколого-геохимическая оценка криоконитов и перигляциальных почв Приэльбрусья и Заилийского Алатау в условиях антропогенной нагрузки и дегляциации

**Иван Денисович Кушнов¹, Рустам Хасанбиевич Темботов²,
Иван Олегович Нехаев³, Тимур Ильгизович Низамутдинов⁴,
Евгений Васильевич Абакумов⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

² Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН, Нальчик, Россия

³ Институт зоологии РК, Алматы, Казахстан

⁵ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной
микробиологии, Санкт-Петербург, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0002-8018-7359>, st084838@student.spbu.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-2342-4653>, r.tembotov@spbu.ru

³ <https://orcid.org/0000-0002-9464-715X>, inekhaev@gmail.com

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-2600-5494>, t.nizamutdinov@spbu.ru

⁵ <https://orcid.org/0000-0002-5248-9018>, e.abakumov@spbu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного исследования, направленного на оценку уровня загрязнения и биогеохимических особенностей криоконитов и перигляциальных почв, в двух контрастных регионах: Приэльбрусье (Центральный Кавказ, Россия) и Заилийский Алатау (Северный Тянь-Шань, Казахстан). Целью работы было выявление особенностей накопления и переноса тяжелых металлов (Cu, Zn, Ni, Pb, Cd), их взаимодействия с основными физико-химическими параметрами почв и отложений, а также оценка потенциального экологического риска для перигляциальных зон. Установлено, что криокониты играют ключевую роль как резервуары и потенциальные источники загрязнения для формирующихся экосистем перигляциальной зоны. Наибольшее загрязнение всеми изученными тяжелыми металлами в Приэльбрусье выявлено на леднике Гарабаши, что преимущественно связано с близостью ледника к туристической инфраструктуре и атмосферным переносом пылевых частиц из Баксанского ущелья и удаленных промышленных регионов. В Заилийском Алатау основным фактором формирования экологических рисков является накопление кадмия в криоконитах (макс. 0,85 мг/кг) и почвах (макс. 1,06 мг/кг), которое предположительно обусловлено в меньшей степени естественными процессами выветривания, а в большей – антропогенной деятельностью (в частности, функционирование и развитие горнолыжного кластера «Чимбулак», атмосферный перенос выбросов из г. Алматы и индустриальных центров азиатского региона). Расчет геохимических индексов (Z_c , $NCPI$, $PERI$) показал низкий уровень общего загрязнения криоконитов и почв в Приэльбрусье, но выявил высокие и чрезвычайно высокие уровни экологического риска в Заилийском Алатау, преимущественно из-за накопления кадмия и его высокой экотоксичности.

Ключевые слова: криокониты, литоземы, органо-аккумулятивные почвы, приледниковые экосистемы, тяжелые металлы, геохимические индексы, Кавказ, Тянь-Шань

Источник финансирования: Исследование проведено при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета, проект № 132392751.

Благодарность: Авторы выражают благодарность в проведении исследования центру «Методы анализа состава вещества» научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

Для цитирования: Кушнов И.Д., Темботов Р.Х., Нехаев И.О., Низамутдинов Т.И., Абакумов Е.В. Эколого-геохимическая оценка криоконитов и перигляциальных почв Приэльбрусья и Заилийского Алатау в условиях антропогенной нагрузки и дегляциации // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2026. № 75. С. 6–41. doi: 10.17223/19988591/75/1

SOIL SCIENCE

Original article

doi: 10.17223/19988591/75/1

Ecological and geochemical assessment of cryoconite and periglacial soils in the Elbrus region and Trans-Ili Alatau under anthropogenic pressure and deglaciation

Ivan D. Kushnov¹, Rustam Kh. Tembotov², Ivan O. Nekhaev³, Timur I. Nizamutdinov⁴, Evgeny V. Abakumov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russian Federation*

² *Tembotov Institute of Ecology of Mountainous Territories of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russian Federation*

³ *Institute of Zoology of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan*

⁵ *All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, St. Petersburg, Russian Federation*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-8018-7359>, st084838@student.spbu.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-2342-4653>, r.tembotov@spbu.ru

³ <https://orcid.org/0000-0002-9464-715X>, inekhaev@gmail.com

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-2600-5494>, t.nizamutdinov@spbu.ru

⁵ <https://orcid.org/0000-0002-5248-9018>, e.abakumov@spbu.ru

Summary. The rapid retreat of mountain glaciers worldwide exposes new periglacial zones, creating fragile primary ecosystems. These areas are increasingly subjected to anthropogenic pressures from tourism, industry, and agriculture. Cryoconites - supraglacial organo-mineral sediments - act as biogeochemical hotspots on glacier surfaces. They accumulate nutrients and airborne pollutants, which are subsequently transported to periglacial ecosystems via fluvio-glacial processes. A comparative assessment of the ecotoxicological status of these environments across different geographical contexts is essential for understanding environmental risks and developing

effective monitoring strategies. This study aims to conduct a comparative biogeochemical and ecotoxicological assessment of cryoconites and periglacial soils in two key mountain regions: the Elbrus area (Central Caucasus, Russia) and the Trans-Ile Alatau (Northern Tien Shan, Kazakhstan). The specific objectives were to: (1) identify key chemical properties; (2) assess carbon accumulation and microbial activity; (3) determine trace element concentrations (Cu, Zn, Ni, Pb, Cd); (4) calculate geochemical indices; and (5) evaluate the impact of anthropogenic activity on pollution levels.

The research was conducted during the summer of 2024 across two territories (See Fig. 1 and Fig. 2). In the Elbrus area, cryoconite samples were collected from three glaciers (Garabashi, Maly Azau, and Shkhelda), alongside soil samples from the Terskol and Baksan gorges. In the Trans-Ile Alatau, cryoconite samples were taken from two glaciers (Morenny and Bogdanovich), with periglacial soils sampled in the Big Almaty Gorge (BAG) and Left Talgar Gorge (LTG). Laboratory analyses included measurements of pH, organic carbon (C_{org}) content via wet spectrophotometry, basal respiration (BR) using closed-chamber incubation, and trace element quantification by atomic absorption spectrometry. Geochemical indices, including the Total Pollution Index (Z_c), Nemerow Pollution Index ($NCPI$), and Potential Ecological Risk Index ($PERI$), were calculated using regional background values.

The analysis of basic physicochemical properties (See Fig. 3) revealed that cryoconites from the Garabashi Glacier (Elbrus area) exhibited the highest levels of C_{org} (up to 1.41%) and the most substantial basal respiration (maximum 41.80 mg CO_2 /g per day), indicating pronounced microbial activity. Among the soils studied, those from the Left Talgar Gorge (Trans-Ile Alatau) had the highest C_{org} content ($5.31 \pm 2.84\%$) and the most acidic pH values, whereas soils from the Baksan Gorge were closer to neutral.

Trace element analysis of cryoconites revealed distinct regional pollution patterns (See Fig. 4). The Garabashi Glacier was the most contaminated site in the Elbrus region, exhibiting significantly higher concentrations of Cu (20.73 ± 8.88 mg/kg) and Pb (27.08 ± 12.99 mg/kg) compared to neighbouring glaciers. Conversely, cryoconites from the Trans-Ile Alatau glaciers were characterised by markedly elevated concentrations of Cd. Notably, the background Morenny Glacier exhibited higher Cd levels (0.81 ± 0.03 mg/kg) than the anthropogenically influenced Bogdanovich Glacier (0.48 ± 0.03 mg/kg), strongly suggesting the long-range atmospheric transfer of polluted dust. In periglacial soils (See Fig. 5), the highest levels of all studied trace elements were found in the Left Talgar Gorge, significantly exceeding those at the background BAU site. Within the Elbrus area, soils from Terskol Gorge were more contaminated with Cu, Zn, and Ni than those from Baksan Gorge, while the latter showed higher Cd accumulation.

Correlation analysis (See Fig. 6) revealed a strong positive relationship between all trace elements, except for Cd, in the Elbrus area. This suggests a common anthropogenic source driven by intensive local tourism infrastructure, including car traffic, heating facilities, construction, and cable car usage. In the Trans-Ile Alatau, correlations were more element-specific (e.g., Ni-Cd, Cu-Pb), indicating a complex mixture of pollution sources heavily influenced by long-range atmospheric transport. Additionally, a strong positive correlation between C_{org} and most trace elements was observed in both regions, emphasising the high sorption capacity of organic matter and its critical role in pollutant binding.

Integrated risk assessment using geochemical indices (See Fig. 7) provided crucial ecotoxicological insights. While the Z_c and $NCPI$ indices indicated absent to low overall pollution levels in most samples, the $PERI$ index revealed significant regional disparities. All samples from the Elbrus area fell into the low ecological risk category ($PERI < 90$). In contrast, cryoconites from the Trans-Ile Alatau glaciers and BAU soils posed a moderate to high ecological risk, whereas soils from the Left Talgar Gorge reached a very high ecological risk level ($PERI \geq 360$). This risk is predominantly

driven by the high toxicity and elevated input of cadmium (Cd), originating from emissions in the city of Almaty and distant Asian industrial centres. However, it is not critical for agriculture, provided that environmental monitoring and pasture management are implemented.

The study demonstrates that cryoconites are significant accumulators of trace elements, playing a role in the transfer of pollutants to periglacial ecosystems. While the Elbrus area is primarily affected by localized tourism pressure, the Trans-Ile Alatau region experiences a combination of local and long-range atmospheric pollution. These findings underscore the necessity of implementing regular ecotoxicological monitoring in vulnerable high-mountain regions, with a particular focus on cadmium dynamics and its potential transfer into agricultural food chains in pastoral lands.

The article contains 7 Figures and 77 References.

Keywords: cryoconites, Leptosols, Umbrisols, glacial ecosystems, heavy metals, geochemical indices, Caucasus, Tien Shan

Fundings: The study was conducted with the support of St. Petersburg State University, project No. 132392751.

Acknowledgments: The authors acknowledge the Center for Methods of Material Composition Analysis at the St. Petersburg State University Research Park for their assistance in conducting the research.

For citation: Kushnov ID, Tembotov RKh, Nekhaev IO, Nizamutdinov TI, Abakumov EV. Ecological and geochemical assessment of cryoconite and periglacial soils in the Elbrus region and Trans-Ili Alatau under anthropogenic load and deglaciation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2026;74:6-41. doi: 10.17223/19988591/75/1

Введение

Тяжелые металлы (ТМ) – элементы с атомной массой более 50 и плотностью $> 8 \text{ г/см}^3$, которые необходимы для экосистем и человека в низких концентрациях, в то время как превышение установленных нормативов концентраций [1] может представлять многочисленные риски для окружающей среды и здоровья человека [2]. К этой группе элементов относятся, в числе прочих, медь, цинк, никель, свинец и кадмий. ТМ обладают высокой токсичностью, способностью к биоаккумуляции и устойчивостью в окружающей среде. Их накопление в почвах нарушает биохимические циклы, снижает биоразнообразие и представляет угрозу для здоровья человека через пищевые цепи. В отдельных полярных и горных регионах эта проблема усугубляется сочетанием процессов активного выветривания, приводя к поступлению потенциально токсичных элементов, и антропогенных факторов, среди которых туризм играет значительную роль. Исследование на территории Алтайского хребта [3] показало, что поток туристического автотранспорта, составляющий до 40 тыс. автомобилей за сезон, в 5-метровой зоне увеличивает концентрации свинца на 12,5–15,8 мг/кг, цинка – на 15,6–17,1 мг/кг, а общий уровень ТМ – в 2–4 раза по сравнению с фоновыми значениями, постепенно снижаясь при движении к границе 10-метровой зоны от автодороги. Кроме того, для горных ландшафтов характерна нисходящая миграция элементов с горных вершин и расположен-

ных на них ледников в перигляциальную зону, где происходит аккумуляция привнесенного материала.

Криокониты – темноокрашенные органоминеральные отложения на поверхности ледников – играют важную роль в перераспределении веществ в полярных и высокогорных районах, являясь «резервуаром» для элементов и микроорганизмов в гляциальной зоне. Они впервые были описаны шведским исследователем в 1870 году на ледниках Гренландии [4]. Детальным изучением свойств криоконитов на поверхности ледников Тянь-Шаня занималась М.А. Глазовская [5], которая установила эоловое происхождение тонкодисперсного супрагляциального материала, присутствие в нем сине-зеленых водорослей и бактериальных сообществ, обнаружила феномен накопления в нем органического вещества, а также выявила их роль в первичном почвообразовании путем переотложения криоконитов в процессе дегляциации. Современные исследования [6, 7] также отмечают роль супрагляциальных отложений в ускорении процессов первичной сукцессии на участках, освободившихся от ледникового покрова, за счет переотложения мелкодисперсного материала, богатого биогенными элементами и микрофлорой. Е.А. Ponieska et al. [8] обнаружили, что криокониты имеют сходные с почвами микробные сообщества, которые устойчивы к суровым условиям окружающей среды. Эти микроорганизмы обладают способностью к фотосинтезу, нитрификации и денитрификации, что влияет на биогеохимические циклы в гляциальных и перигляциальных зонах. Кроме того, базальное дыхание криоконитов сопоставимо с таковым в почвах, расположенных в теплых и богатых питательными веществами районах [9], что указывает на вероятное усиление биологического выветривания при флювиогляциальном переносе микроорганизмов в первичные перигляциальные почвы.

Помимо накопления элементов питания и присутствия разнообразных микробных сообществ, криокониты также способны аккумулировать различные поллютанты, например, полиарены, тяжелые металлы, различные виды микропластика и радионуклиды, которые также преимущественно с флювиогляциальными потоками переносятся в перигляциальную зону и способны накапливаться в местных почвах, выступающих в роли биохимического барьера [10]. P. Rozwalak et al. [11] отмечали, что криокониты могут служить индикатором загрязнения ледниковых зон, в особенности вблизи участков с высокой антропогенной нагрузкой. Ранее тяжелые металлы как естественного, так и антропогенного происхождения были обнаружены в супрагляциальных отложениях и локальных почвах в высоких концентрациях на различных участках полярных и высокогорных регионов [12]. Кроме того, загрязненные частицы криоконитов могут присутствовать в виде включений непосредственно в толще ледника, что приводит к высвобождению этих элементов в течение десятилетий [13].

Центральный Кавказ является наиболее высокогорной частью Кавказского хребта, где располагаются несколько сотен ледников, которые являются источником пресной воды и растворенных элементов как для перигляциальной зоны, так и для густонаселенных и агропромышленных

регионов юга России. Ранее проведенные геохимические исследования [14, 15] указывают на поступление олового материала на поверхность ледников Приэльбрусья как из участков Северной Африки и Ближнего Востока, так и из локальных ущелий. Влияние экзогенного привноса материала объясняет увеличение содержания органического вещества и концентраций цинка, меди и свинца в местных перигляциальных почвах. Ледники Тянь-Шаня также выступают важным источником пресной воды и других различных экосистемных услуг для миллионов людей, живущих в засушливой центральной части Азии. Предыдущие исследования Восточного Тянь-Шаня [16, 17] показали более интенсивное накопление тяжелых металлов на поверхности ледников, чем в окружающих областях, таких как Тибетское нагорье, Япония и Катманду, что было вызвано антропогенной деятельностью. N. Nagatsuka et al. [18] также обнаружили, что криокониты Восточного Тянь-Шаня преимущественно состоят из богатого органическим веществом олового материала, привнесенного из азиатских пустынь.

Как в районе Центрального Кавказа, так и в регионе Северного Тянь-Шаня работы по эколого-геохимической оценке ледниковых и перигляциальных зон немногочисленны и преимущественно носят фрагментарный характер, в то время как горные хребты, ограничивающие атмосферный перенос, и ландшафтно-геологическая неоднородность обуславливают большое воздействие местных факторов на свойства перигляциальных экосистем и криоконитов [19]. Указанные регионы, с одной стороны, подвержены негативному влиянию антропогенной деятельности, в частности, Тырныаузского горно-обогатительного комбината с хвостохранилищем в Приэльбрусье (макс. расстояние по Баксанскому ущелью ~56 км и менее 1 км от туристических объектов) и присутствия промышленного мегаполиса Алматы (~12 км от ледника Богдановича и Левого Талгарского ущелья) в предгорьях Тянь-Шаня. С другой стороны, очевидна важность сельского хозяйства для местного населения и развития территорий. Так, скотоводство, выращивание пшеницы, кукурузы и плодовых культур являются наиболее важной с экономической точки зрения деятельностью для регионов Центрального Кавказа [20], а Алматинская область лидирует по валовому выпуску сельскохозяйственной продукции среди всех регионов Республики Казахстан [21]. Особенно следует отметить вклад туризма и туристической инфраструктуры в загрязнение гляциальных и перигляциальных зон, что связано с присутствием крупнейших в СНГ всесезонных горнолыжных курортов Эльбрус на Кавказе и Чимбулак в Тянь-Шане, которые ежегодно посещают сотни тысяч людей. Ранее [22] на китайской части Тянь-Шаня было установлено, что активная туристическая деятельность в высокогорьях существенно увеличивает загрязнение местных почв медью, цинком и мышьяком, что связано с работой и строительством инфраструктуры, а также автотранспортом. В перигляциальной зоне экосистемы особенно уязвимы к дополнительной антропогенной нагрузке, так как их формирование происходит преимущественно на привнесенных отложениях, в том числе супрагляциальных. Таким образом, целью данной работы является сравнение биогеохимических свойств криоконитов и пе-

ригляциальных почв Приэльбрусья и Северного Тянь-Шаня как важнейшей части первичных экосистем, расположенных в антропогенно-нарушенных и фоновых участках, и некоторых особенностей их эколого-геохимического состояния, в частности: (1) выявление ключевых химических свойств почв и криоконитов; (2) установление особенностей накопления и переноса углерода в исследуемых участках, включая роль микробных сообществ; (3) определение содержания некоторых тяжелых металлов; (4) расчет геохимических индексов и (5) оценка влияния антропогенной деятельности на загрязнение и экологические риски указанных высокогорных перигляциальных экосистем.

Объекты и методы

Исследование проводилось в летний период на двух территориях: Приэльбрусье, Кабардино-Балкарская Республика, Россия (август 2022 г.) и хребет Заилийский Алатау, Северный Тянь-Шань, Республика Казахстан (август 2024 г.) (рис. 1).

Климат первой территории исследования (Приэльбрусье) высокогорный континентальный, среднегодовая температура атмосферного воздуха колеблется от 2,5°C в приледниковой зоне до 8,05°C на территории всей перигляциальной зоны до предгорий [23], годовое количество осадков составляет 500–700 мм, на больших высотах возрастает до 1100 мм [24].

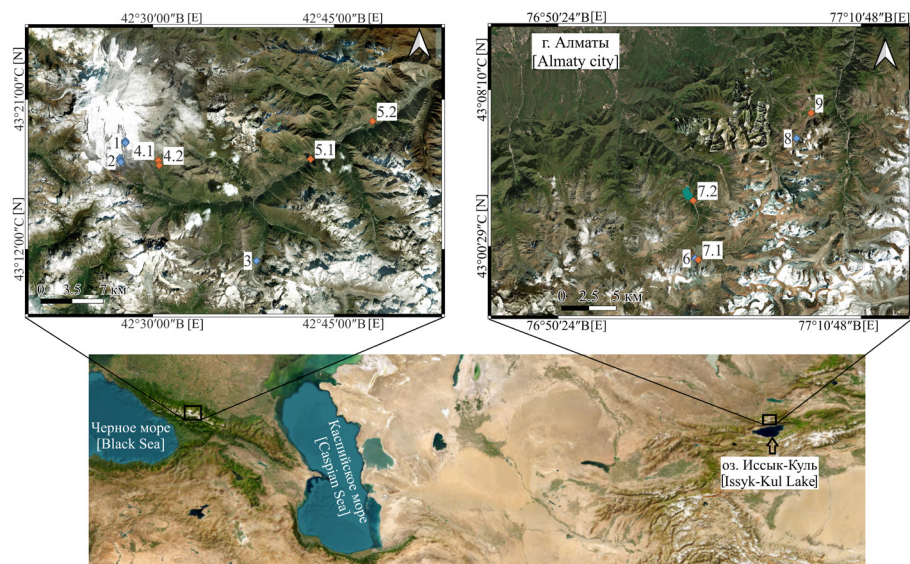


Рис. 1. Местоположение территорий исследования. Цифрами обозначены номера участков исследования. Цвет пунсона соответствует типу отобранного материала: синий – криокониты, оранжевый – почвы

[Fig. 1. Location of study sites. Numerical values indicate study sites numbers. Marker colors indicate the type of sampled material: blue for cryoconite, orange for soils]

Для зоны альпийских лугов и пойменных участков характерны травянистые луга с преобладанием овсяницы (*Festuca pratensis* Huds.), на склонах ущелий встречаются сосновые (*Pinus sylvestris* L.) и берзовые (*Betula pendula* Roth) леса [25]. Почвообразующий материал преимущественно представлен моренными отложениями, карбонатными глинами и известковыми песчаниками [26]. Геолого-минералогическое строение неоднородно, преимущественно представлено плейстоцен-голоценовыми породами Эльбрусского вулканического района, сложенными игнимбритами, лавами и туфами разнообразного состава, для которых характерно обогащение редкоземельными металлами (Zr, Hf и пр.), также обнаруживаются участки с повышенными концентрациями Pb, Zn, Sb, Mo [27]. На данной территории располагаются 5 участков исследований, находящихся на разных высотах вдоль одной геохимической катены.

Участок № 1. Ледник Гарабаши, южный склон г. Эльбрус. Питает р. Гарабаши, которая затем впадает в р. Баксан. Образцы отложений отобраны из криоконитовых «лунок» на высоте 3850 м над ур. м. Координаты: 43°18'18" с. ш., 42°27'45" в. д. Участок исследования находится в ~ 200 м от круглогодично работающих и активно посещаемых туристических объектов: автодороги, станции канатной дороги, кафе, гостиниц, смотровой площадки и горнолыжных трасс.

Участок № 2. Ледник Малый Азау, южный склон г. Эльбрус. Питает р. Малый Азау, которая затем впадает в р. Баксан. Образцы криоконитов отобраны с поверхности ледника на высоте 3390 м над ур. м. Координаты: 43°17'25" с. ш., 42°27'20" в. д. Участок исследования находится в ~ 500 м от туристических объектов: автодороги, станции канатной дороги, кафе, смотровой площадки и горнолыжных трасс.

Участок № 3. Ледник Шхельда. Питает р. Шхельда, которая затем впадает в р. Баксан. Образцы криоконитов отобраны с поверхности ледника на высоте 2385 м. Координаты: 43°11'27" с. ш., 42°38'45" в. д. Расстояние до ближайшего поселения Эльбрус и автотрассы составляет ~ 7,5 км, а до ближайшего используемого строения, альплагеря «Шхельда», ~ 4,5 км. При этом участок исследования располагается в удалении от антропогенно-нагруженного Баксанского ущелья, вблизи него отсутствуют оживленные туристические трассы, а также не осуществляется пастбищная деятельность.

Участок № 4. Ущелье Терскол. Здесь и далее почвы были описаны и названы согласно Классификации и диагностике почв России [28]. Было заложено два почвенных разреза, образцы отбирали из органоминеральных и минеральных горизонтов. Участок 4.1: склон в пойме р. Терскол, высота 2642 м над ур. м., почва темногумусовая оргоаккумулятивная, профиль AU–AUm–AC–C, глубина 45 см, координаты: 43°17'21" с. ш., 42°30'28" в. д. Участок 4.2: пастбищный луг, высота 2580 м над ур. м., почва темногумусовая оргоаккумулятивная, профиль Oi–AU–AC, мощность профиля 25 см, координаты: 43°17'4" с. ш., 42°30'39" в. д. Оба участка находятся на расстоянии ~ 3–3,5 км от села Терскол и автотрассы, в 50–150 м от туристических маршрутов, а также активно используются как пастбища (отмечается перевыпас).

Участок № 5. Баксанское ущелье. Были заложены два почвенных разреза, образцы отобраны из органоминеральных и минеральных горизонтов. Участок 5.1: правый берег р. Баксан, вблизи пос. Нейтрино, высота 1816 м над ур. м., почва – литозем грубогумусовый, профиль АО–Ah–AC, глубина 25 см, координаты: 43°17'21" с. ш., 42°42'57" в. д. Участок 5.2: левый берег р. Баксан, вблизи пос. Верхняя Балкария, высота 1490 м над ур. м., почва грубогумусовая органоаккумулятивная, профиль АО–AC–Cca, мощность профиля 58 см, координаты: 43°19'44" с. ш., 42°48'09" в. д. Основным источником поллютантов является автотрасса, расположенная в 100–150 м от участков исследования.

Ветровой режим Приэльбрусья характеризуется выраженной высотной дифференциацией. На высотах более 4000 м над ур. м. ветровой режим преимущественно подчиняется макромасштабному западному атмосферному переносу, что определяет доминирование западного направления ветра на больших высотах в течение года [29]. Напротив, на меньших высотах, в особенности в пределах ущелий, макромасштабные атмосферные потоки блокируются орографическими барьерами и глобальный перенос перекрывается локальной горно-долинной циркуляцией [30]. Как показывают результаты спектрального анализа метеорологических рядов, на этих участках ветровой режим имеет четкий суточный ритм, привязанный к радиационному прогреву склонов, днем формируется восходящий поток по долине к леднику, а ночью сток охлажденных воздушных масс [31]. Скорости ветра также различаются: от регулярных штормовых значений 30–50 м/с на больших высотах до 2–5 м/с в долинах [29].

Вторая территория исследования располагается в горном хребте Заилийский Алатау. Отбор проб проводился в Большом Алматинском ущелье (БАУ) и Левом Талгарском ущелье, вблизи курорта Чимбулак. Горный массив сложен гранитоидами, эффузивами и их туфами, эффузивно-осадочными породами, песчаниками, сланцами и мраморами [32]. Климат высокогорный резко континентальный, среднегодовая температура атмосферного воздуха в теплый период года (апрель–октябрь) с 2010 по 2020 г. на метеостанции вблизи Большого Алматинского озера, расположенного в БАУ, составила 7,9°C, а среднегодовое количество осадков за соответствующий период – 735 мм [33]. Растительность БАУ разнообразна, что связано с резкой сменой высотных поясов. Вблизи Большого Алматинского озера располагается тундрово-лесная зона с преобладанием ели Шренка (*Picea schrenkiana* Fisch. & C.A.Mey.), лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.), пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) и включениями ив (*Salix niedzwieckii* Goerz., *S. alata* Stschegl.) в пойменных участках. Пояс альпийских лугов представлен преимущественно осоками (*Carex melanostachya* M.Bieb. ex Willd., *C. praecox* Schreb.), дельфиниумом (*Bistorta vivipara* L.) и лютиками (*Ranunculus* sp.) [34]. Почвообразующие породы обогащены кварцем, включениями гранитов, гнейсов, порфириновых вулканических пород, габбро и андезита. Зона исследования находится в границах Иле-Алатауского государственного национального природного парка, что ограничивает антропогенную деятельность на данной территории.

Климатические условия Левого Талгарского ущелья отличаются от БАУ из-за большей высотности. Согласно данным с локальной метеорологической станции Мынжики, среднегодовая температура теплого периода (апрель–октябрь) 2010–2020 гг. составила 4,9°C, а среднегодовое количество осадков за соответствующий период – 680 мм [33]. Растительность преимущественно представлена травянистыми сообществами, в частности, осокой (*Carex stenocarpa* Turcz. ex V.I.Krecz.) и мятликом (*Poa alpina* L.) [34]. Почвообразующие породы преимущественно представлены лессовыми и флювиогляциальными отложениями с включениями девонских гранитов и гранодиоритов [35].

Для всех участков исследования в Заилийском Алатау ведущим фактором пространственного перераспределения аэрозолей выступает выраженная горно-долинная циркуляция, формируя потоки воздуха скоростью 2–4 м/с, восходящие в дневное время от г. Алматы к ледникам [36]. Другим фактором формирования воздушных потоков является субширотный региональный атмосферный перенос, на что указывает доминирование северных и южных ветров на метеорологических станциях Большого Алматинского озера и Мынжики в течение года. В Заилийском Алатау были заложены 4 участка исследования:

Участок № 6. Ледник Моренный. Питает р. Озерная, которая впадает в Большое Алматинское озеро. Пробы криоконитов отобраны с поверхности ледника на высоте 3264 м над ур. м. Координаты: 42°59'54" с. ш., 76°59'37" в. д. Расстояние до застроенной части г. Алматы составляет около 20 км.

Участок № 7. Большое Алматинское ущелье. Были заложены два почвенных разреза, образцы отобраны из органоминеральных и минеральных горизонтов. Участок 7.1: вблизи ледника Моренный, высота 3263 м над ур. м., почва – петрозем сильнощебнистый, профиль W–AC–R, глубина 8 см, координаты: 42°59'49" с. ш., 76°59'48" в. д. Проективное покрытие участка ~30%, преимущественно представлен гравилатом (*Geum* sp.) и камфоросмой (*Camphorosma monspeliaca* L.). Участок 7.2: залежное пастбище, пойма р. Озерная, правый берег, вблизи Большого Алматинского озера, высота 2527 м над ур. м., почва – аллювиальная грубогумусовая (дерновая), профиль АО–AC–C, мощность профиля 24 см, координаты: 43°02'45" с. ш., 76°59'29" в. д. Проективное покрытие участка 100% с преобладанием осоки (*Carex praecox* Schreb.), полыни (*Artemisia absinthium* L.) и ивы (*Salix niedzwieckii* Goerz.).

Участок № 8. Ледник Богдановича. Пробы криоконитов отобраны с поверхности ледника на высоте 3420 м над ур. м. Координаты: 43°05'49" с. ш., 77°06'22" в. д. Расстояние до верхнего участка курорта Чимбулак с гостиницами, кафетериями и пр. составляет ~2 км, до г. Алматы ~15 км.

Участок № 9. Левое Талгарское ущелье, вблизи верхнего участка курорта Чимбулак с гостиницами, кафетериями и пр. (менее 1 км) и канатной дороги с горнолыжными трассами (~150 м), используется в качестве пастбища в летний период. Расстояние до г. Алматы ~13,5 км. Высота 2949 м над ур. м., почва – темногумусовая органоаккумулятивная, профиль АО–

АС–С, мощность профиля 30 см, координаты: 43°07'03" с. ш., 77°07'18" в. д. Растительность представлена разнотравьем, проективное покрытие 100%.

Фотографии некоторых участков исследований и объектов изучения представлены на рис. 2.

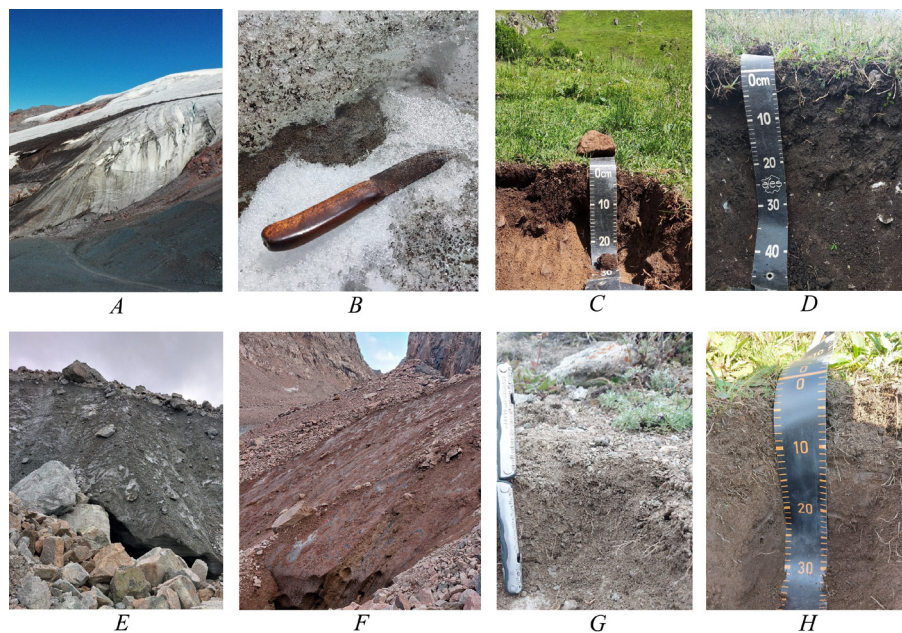


Рис. 2. Некоторые участки исследования на территории Приэльбрусья (сверху) и Заилийского Алатау (снизу). *A* – ледник Малый Азау, *B* – криоконит на леднике Гарабаша, *C* – темногоhumусовая органо-аккумулятивная почва в ущелье Терскол, *D* – грубоhumусовая органо-аккумулятивная почва в Баксанском ущелье, *E* – ледник Моренный, *F* – ледник Богдановича, *G* – литозем гумусово-слаборазвитый в БАУ, *H* – темногоhumусовая органо-аккумулятивная почва в Левом Талгарском ущелье
[Fig. 2. Some research sites at the Elbrus area (top) and the Trans-Ili Alatau (bottom). *A* is the Maly Azau glacier, *B* is cryoconite on the Garabashi glacier, *C* is soil in the Terskol Gorge, *D* is soil in the Baksan Gorge, *E* is Moraine glacier, *F* is Bogdanovich Glacier, *G* is soil in the Big Almaty Gorge, *H* is soil in the Left Talgar gorge]

Для проведения химических анализов пробы почв и криоконитов были высушены в лабораторных условиях при комнатной температуре, перемолоты в ступке и просеяны через сито с диаметром ячеек 1 мм. Для определения углерода органических соединений (C_{org}) почвы дополнительно растирались в агатовой ступке. Определение общей (pH_{H_2O}) и обменной (pH_{KCl}) кислотностей производилось потенциометрическим методом, содержание C_{org} определялось методом Уолкли-Блэка со спектрофотометрическим окончанием [37], интенсивность базального дыхания – инкубационным методом закрытых камер [38]. Содержание тяжелых металлов, обладающих токсическим действием на экосистемы и человека, в высоких концентрациях и наиболее распространенных в криоконитах и перигляци-

альных почвах [12], таких как медь (Cu), цинк (Zn), никель (Ni), свинец (Pb) и кадмий (Cd), было измерено методом атомно-абсорбционной спектроскопии [39].

Для определения степени загрязнения криоконитов и почв, а также оценки их экотоксикологического состояния применяли следующие геохимические индексы: суммарный показатель загрязнения почвы (Z_c), интегральный индекс загрязнения Немерова ($NCPI$), индекс экологического риска ($PERI$).

Индекс Z_c является стандартным признанным способом оценки загрязнения почв и рассчитывается следующим образом:

$$K_c = \frac{C_i}{C_b},$$

$$Z_c = \sum (K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n - 1),$$

где K_c – коэффициент концентрации; C_i – содержание конкретного элемента в почве; C_b – региональная фоновая концентрация соответствующего элемента в почве; K_{ci} – коэффициент концентрации определенного элемента; n – общее количество определяемых элементов.

Интегральный индекс загрязнения Немерова ($NCPI$) – комплексный метод оценки загрязнения, который учитывает вклад каждого тяжёлого металла и потенциальную опасность металла-загрязнителя с наибольшим содержанием. Он рассчитывается по формуле [40]

$$NCPI = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_c\right)^2 + K_{c \max}^2}{2}},$$

где n – общее количество определяемых элементов; $K_{c \max}$ – максимальное значение коэффициента концентрации.

Индекс экологического риска ($PERI$) учитывает токсическое влияние каждого из тяжелых металлов на экосистему и рассчитывается следующим образом [41]:

$$PERI = \sum_{i=1}^n E_r^i, \quad E_r^i = T_r^i \times PI,$$

где n – общее количество определяемых элементов; E_r^i – фактор экологического риска конкретного элемента; T_r^i – степень токсичности каждого элемента, определенная ранее.

В качестве ориентировочных региональных фоновых концентраций [42] были использованы усредненные литературные данные содержания изучаемых элементов на природных участках заповедных территорий, в частности в Тебердинском национальном парке [43], на Кубано-Малкинском ландшафте [44] и в отдаленных частях Иле-Алатауского государственного национального природного парка [45]. При этом указанные значения рассматривались не как фон для строго аналогичных типов почв, а как сравнительный ориентир в отсутствие нормативно установленных локальных фоновых концентраций.

Статистический анализ данных проводился при помощи программного обеспечения STATISTICA v. 10 (TIBCO Software Inc., США) и GraphPad Prism v. 10 (Dotmatics Inc., США). Значимость различий физико-химических свойств между криоконитами с разных ледников и почвами из разных ущелий определяли при помощи дисперсионного анализа (ANOVA). Для корреляционного анализа использовали коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмана с предварительной проверкой нормальности выборки тестом Шапиро-Уилка.

Результаты исследования и обсуждение

Результаты базовых физико-химических анализов, представленные на рисунке 3, указывают на существующие различия и сходства между изучаемыми образцами и территориями исследования. Минимальные различия были установлены между значениями актуальной кислотности в криоконитах, была отмечена слабокислая реакция среды в подавляющем большинстве образцов.

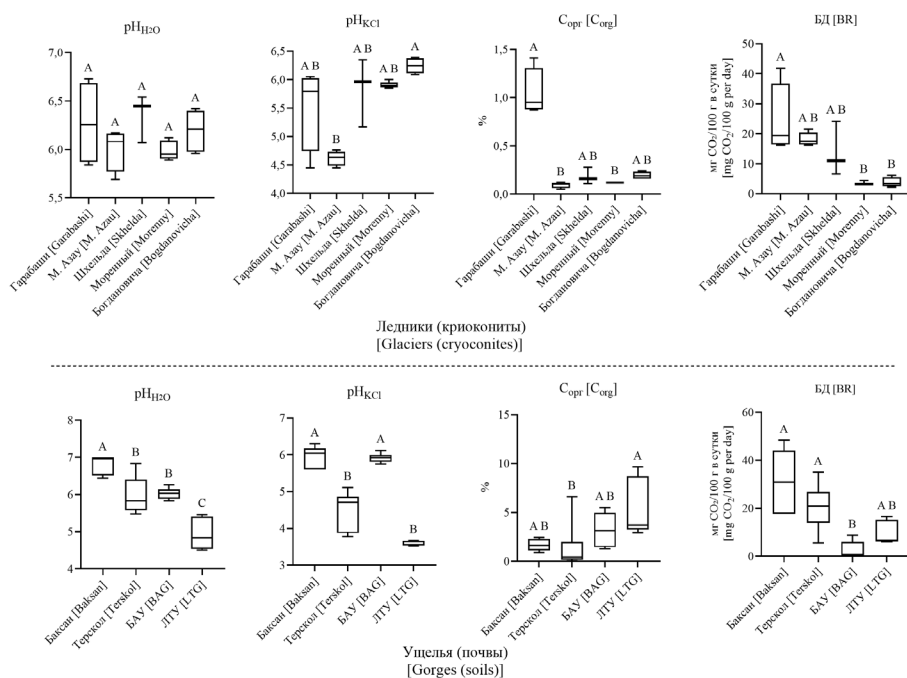


Рис. 3. Значения показателей актуальной кислотности (pH_{H2O}), обменной кислотности (pH_{KCl}), углерода органических соединений (C_{org}), базального дыхания (БР) в исследуемых образцах с поверхности ледников (сверху) и из ущелий (снизу).

A, B, C – группы значимости

[Fig. 3. The values of the indicators of actual acidity (pH_{H2O}), metabolic acidity (pH_{KCl}), carbon of organic compounds (C_{org}), basal respiration (BR) in the studied samples from the surface of glaciers (top part) and from gorges (bottom part). A, B, C - letter-based significance groups]

При этом значения обменной кислотности в криоконитах варьировали от среднекислой на леднике Малый Азау до нейтральной на леднике Богдановича. Содержание углерода органических соединений в криоконитах преимущественно не превышало 0,15% за исключением образцов с ледника Гарабаши, где среднее значение $C_{\text{орг}}$ составляло $1,05 \pm 0,25\%$. Базальное дыхание также было наибольшим в образцах с ледника Гарабаши (до 41,80 мг/CO₂ на 100 г в сутки), что указывает на высокую микробиологическую активность в указанных супрагляциальных отложениях. При этом значения базального дыхания криоконитов на территории Приэльбрусья были существенно выше, чем на территории Заилийского Алатау, что может быть связано с различным таксономическим составом микроорганизмов на исследуемых территориях и их климатическими особенностями. Кроме того, высокая вариабельность базального дыхания наблюдалась в Приэльбрусье (ледники Гарабаши и Шхельда), что указывает на влияние прочих факторов, помимо таксономического разнообразия. Согласно исследованию [46], наибольшее влияние на значения респирации криоконитов оказывают мощность слоя супрагляциальных отложений и поступление аллохтонного органического вещества, при увеличении которых растёт и микробиологическая активность, что объясняет разницу между значениями базального дыхания, в том числе в пределах одного исследуемого участка.

В почвах наблюдалась более существенная вариабельность значений кислотности, чем в криоконитах: по результатам измерения актуальной кислотности, близкая к нейтральной реакция среды была характерна для почв Баксанского ущелья, слабокислая – для ущелья Терскол и БАУ, а среднекислая – для Левого Талгарского ущелья. В то же время pH_{KCl} в почвах Баксанского ущелья и БАУ находился на уровнях, близких к нейтральным, а почвы ущелья Терскол и Левого Талгарского ущелья были более кислыми. Интересно, что в обоих параметрах кислотности наблюдалось значимое отличие между ущельями на одной территории исследования. Согласно ранее полученным данным [47], с увеличением высоты над уровнем моря и сопутствующими изменениями микроклимата происходит снижение значений pH почвенной среды, что также отмечается и в нашем исследовании, особенно в Приэльбрусье. Кроме того, подкисление почвенного раствора может быть связано с увеличением содержания органического вещества, которое увеличивает способность подкисленных почв адсорбировать ионы водорода, что особенно заметно на примере Заилийского Алатау. Так, в Левом Талгарском ущелье было отмечено наибольшее содержание $C_{\text{орг}}$ (до 9,66%), в то время как в Приэльбрусье максимальное значение не превышало 6,61%. Это соотносится с предыдущими исследованиями горных почв в соседних регионах, в частности, в Восточном Тянь-Шане ($C_{\text{орг}} = 7,11\%$) [48] и Восточном Кавказе ($C_{\text{орг}} = 3,76\%$) [49]. Базальное дыхание почв было более высоким в Приэльбрусье (до 48,40 мг/CO₂ на 100 г в сутки в Баксанском ущелье), чем в Заилийском Алатау (макс. 16,50 мг/CO₂ на 100 г в сутки в Левом Талгарском ущелье). При этом значения БД криоконитов и почв практически не отличались

в пределах одной исследуемой территории ($p > 0,05$), что указывает на значимость супрагляциальных отложений как «оазиса» микробиологической активности высокогорных экосистем. Предыдущее исследование [8] показало, что микроорганизмы криоконитов отличаются высокой жизнеспособностью и толерантностью к суровым условиям окружающей среды, и их присутствие на поверхности ледника, а также перенос в перигляциальную зону играют важную роль в становлении микробиома первичных почв и ускорения биологического выветривания.

В одном из предыдущих исследований [11] подчеркивалось, что криокониты являются важным индикатором экотоксикологического состояния гляциальных и перигляциальных экосистем. Согласно нашим результатам (рис. 4), наибольшее загрязнение всеми исследуемыми тяжелыми металлами в Приэльбрусье характерно для ледника Гарабаша. Следует отметить, что интерпретация повышенных концентраций тяжелых металлов в криоконитах Приэльбрусья должна учитывать возможный литогенный вклад.

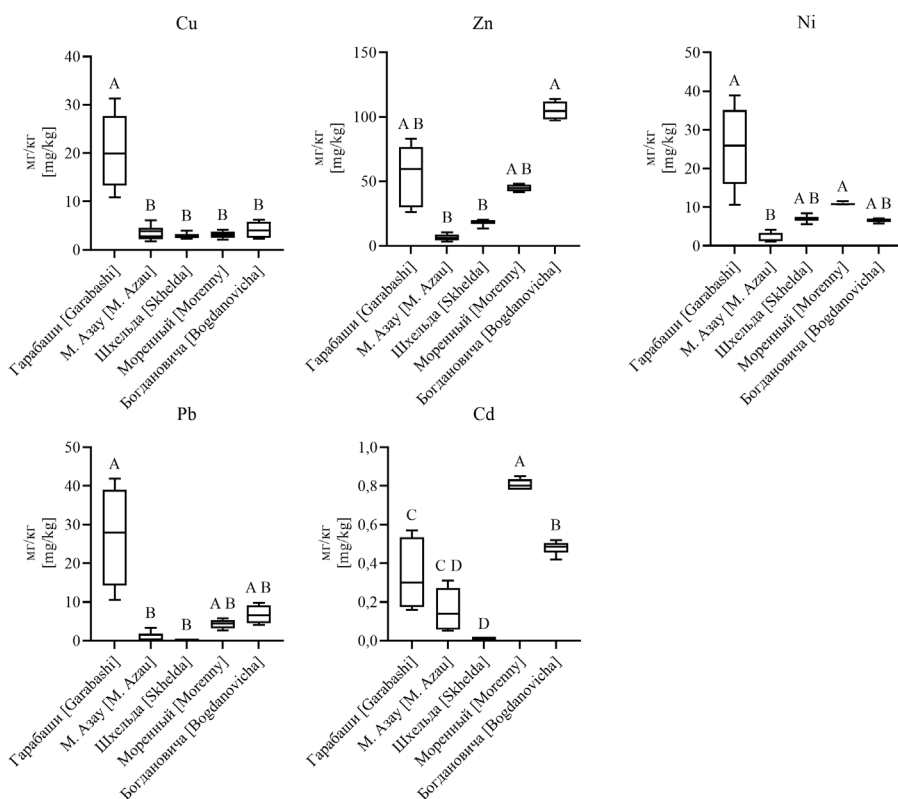


Рис. 4. Содержание тяжелых металлов в криоконитах изучаемых ледников.

A, B, C – группы значимости

[Fig. 4. Trace elements content in cryoconites of the studied glaciers.

A, B, C - letter-based significance groups]

По имеющимся литературным данным [27], для Эльбрусского района характерна халькофильно-литофильная геохимическая специализация с повышенным содержанием Zn и Pb в зонах аргиллизации с образованием свинцово-цинкового оруденения на глубинах нескольких сотен метров. Указанные литологические особенности могут способствовать повышению содержания этих металлов в криоконитах, особенно в условиях активного отступления ледников в Приэльбрусье, сопровождающегося обнажением коренных пород и моренных гряд [50]. При этом содержание меди ($20,73 \pm 8,88$ мг/кг) и свинца ($27,08 \pm 12,99$ мг/кг) на этом участке было значимо выше ($p < 0,05$), чем в криоконитах с ледников Малый Азау и Шхельда, а никеля – значимо выше, чем на леднике Малый Азау. Такие различия указывают на дополнительное поступление элементов на поверхность ледника Гарабаши, связанное не только с естественным литогенным фоном, но и с антропогенной деятельностью.

Особенностью изучаемой территории является присутствие в прилегающем к ледникам Приэльбрусья Баксанском ущелье хвостохранилища законсервированного Тырныаузского ГОК (от ~46 км до ледника Шхельда до ~56 км до ледника Гарабаши), в теле которого законсервировано множество элементов-токсикантов, преимущественно молибдена и вольфрама, но также и меди, цинка и свинца [51]. Наблюдаемый эоловый перенос пылевых частиц хвостохранилища [52], обогащенных неорганическими поллютантами, с восходящими атмосферными потоками в сторону горных вершин и последующее оседание частиц на поверхность ледников способны увеличивать содержание тяжелых металлов в криоконитах. Однако исключительно данный перенос поллютантов не объясняет значимого загрязнения ледника Гарабаши по сравнению с ледниками Шхельда и Малый Азау, так как они также примыкают к Баксанскому ущелью. Другим важным фактором загрязнения ледника Гарабаши, отличающим его от других исследуемых ледников Приэльбрусья, является непосредственная близость к антропогенным источникам загрязнения, связанным с активной туристической деятельностью. Инфраструктура, расположенная в непосредственной близости (~200 м) от ледника Гарабаши, включает канатную дорогу, кафетерии, пункты проката оборудования, лагеря для альпинистов, дороги для вездеходных автомобилей и пр. Исследования, проведенные ранее в различных высокогорных территориях [53–55], также указывают на значимое увеличение загрязнения тяжелыми металлами вблизи туристических зон, связанное с движением автотранспорта, сжиганием топлива для приготовления пищи и обогрева, использованием лакокрасочных и смазочных материалов, складированием различного мусора и пр. Ранее опубликованные данные [56] о содержании тяжелых металлов в образцах снега с ледника Гарабаши также отмечают существенное повышение концентраций тяжелых металлов, в особенности цинка и свинца, вблизи альпинистских стоянок и туристических дорог, что дополнительно указывает на роль активного туризма в загрязнении ледника. Наконец, предыдущие работы, проведенные в Приэльбрусье [57, 58], указывают на роль дальнего атмосферного переноса в загрязнении ледников тяжелыми металлами, связан-

ного с переносом и последующим оседанием в гляциальную зону пылевых частиц, поступающих из промышленных районов Северной Африки и Ближнего Востока. Ледник Гарабаши располагается на наибольшей высоте среди всех исследуемых нами участков, что может обуславливать большее поступление загрязненных аллохтонных пылевых частиц на его поверхность и способствовать накоплению тяжелых металлов в криоконитах.

Содержание тяжелых металлов в криоконитах Заилийского Алатау характеризуется, прежде всего, высокими концентрациями кадмия ($p < 0,05$): $0,81 \pm 0,03$ мг/кг на леднике Моренный и $0,48 \pm 0,03$ мг/кг на леднике Богдановича. Следует отметить, что на фоновом леднике Моренный концентрации кадмия выше, чем на антропогенно-нагруженном леднике Богдановича ($p < 0,001$). Эти результаты объясняются предыдущими исследованиями кернов ледников Тянь-Шаня [59, 60], которые указывают на доминирование аллохтонного атмосферного переноса в поступлении пылевых частиц на поверхность ледников данного региона, что подтверждается доминированием ветров северного и южного направлений на метеостанциях Большого Алматинского озера и Мынжилки в течение года. Эти пылевые частицы обогащены различными тяжелыми металлами, в особенности кадмием из-за металлургических производств, горнодобычи и прочей промышленной деятельности в Северо-Западном Китае, Казахстане и России, откуда аэрозольный материал может поступать в район исследования в результате дальнего атмосферного переноса. Таким образом, различия в атмосферных потоках и большее количество оседающей аллохтонной пыли могут обуславливать повышенное загрязнение ледника Моренный. Кроме того, локальное повышение кадмия может быть обусловлено естественными геологическими факторами, в частности включениями продуктов выветривания гринокитов (CdS) или сфалеритов (ZnS), так как кадмий часто входит в состав цинковых минералов как изоморфная примесь. По имеющимся литературным данным [61], гринокит, сфалерит и другие цинковые минералы были обнаружены в Заилийском Алатау, однако эти данные единичны и относятся к месторождению Ак-Тюз, располагающемуся в более чем 73 км на западе от участков исследования за горными хребтами, что указывает на низкую вероятность атмосферного переноса. Вместе с тем данные о распространении указанных минералов непосредственно в районах исследованных ледников отсутствуют, поэтому такой механизм следует рассматривать как маловероятный и требующий дополнительного подтверждения. Среди других исследуемых элементов на леднике Богдановича отмечается повышенное содержание цинка (до $104,94 \pm 7,40$ мг/кг). В силу отсутствия данных об экстремальных концентрациях цинка литогенной природы в исследуемом районе, наблюдаемые концентрации позволяют предполагать влияние антропогенных факторов, в частности, атмосферный перенос выбросов от многочисленных предприятий свинцово-цинковой металлургии Казахстана, расположенных на севере от ущелья [62].

Содержание тяжелых металлов в почвах изучаемых перигляциальных территорий представлено на рисунке 5. Наибольшие значения всех элементов были выявлены в почвах Левого Талгарского ущелья.

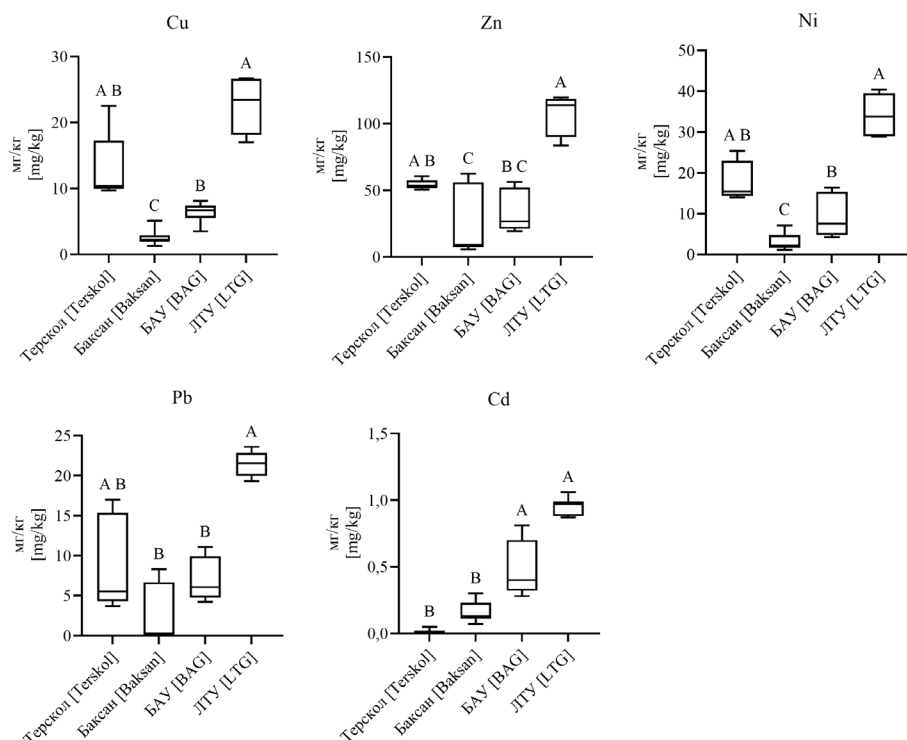


Рис. 5. Содержание тяжелых металлов в почвах изучаемых ущелий.

A, B, C – группы значимости

[Fig. 5. Trace elements content in soils of the studied gorges.

A, B, C - letter-based significance groups]

В большинстве случаев они значимо превышали уровни фонового участка БАУ ($p < 0,05$), что позволяет предположить о влиянии антропогенного воздействия. Среди возможных факторов накопления металлов в почвах Левого Талгарского ущелья выделяется атмосферный перенос элементов из агломерации г. Алматы, что подтверждается литературными [36] и прямыми метеорологическими (ст. Мынжилки) данными о выраженной горно-долинной циркуляции в районе исследования с доминированием ветров северного направления в дневное время. Кроме того, участок исследования в Левом Талгарском ущелье находится менее чем в 1 км от туристической инфраструктуры курорта Чимбулак, что позволяет также рассматривать влияние рекреационной инфраструктуры как важный фактор негативного воздействия на перигляциальные экосистемы.

Предыдущее исследование, проведенное на востоке Казахстана [63], также указывает на существенное увеличение (в 2–3 раза) содержания большинства тяжелых металлов в горных почвах вблизи туристических зон по сравнению с фоновыми участками. Авторы исследования связывают это с автомобильным трафиком, использованием различных электронных компонентов (батареек, аккумуляторов и т.п.) и лакокрасочных материалов [63]. Дополнительное загрязнение почв медью и цинком, связанное

с использованием строительных материалов, систем охлаждения и смазочных материалов, также отмечается в Восточном Тянь-Шане [22]. В Приэльбрусье почвы ущелья Терскол отличались большим содержанием тяжелых металлов по сравнению с Баксанским ущельем, что может быть связано с особенностями ландшафта, меньшим уровнем миграции элементов, а также с большей высотой и климатическими особенностями, способствующими осаждению частиц и аэрозолей, привнесенных с горно-долинной циркуляцией. Значимо более высокое содержание было характерно для меди ($13,12 \pm 5,38$ мг/кг), цинка ($54,86 \pm 3,81$ мг/кг) и никеля ($18,04 \pm 4,67$ мг/кг).

Согласно рассчитанной корреляционной матрице по данным из Приэльбрусья (рис. 6, слева), сильная или очень сильная положительная корреляция ($r > 0,70$, $p < 0,01$) характерна между всеми исследуемыми тяжелыми металлами, за исключением кадмия, что косвенно указывает на единый источник поступления этих элементов. Учитывая отсутствие выходов полиметаллических руд, содержащих все исследуемые металлы, на данной территории, можно предположить, что значимым источником поступления тяжелых металлов является антропогенная деятельность, связанная как с туристической деятельностью, так и с влиянием хвостохранилища и ранее производимой деятельностью по переработке и обогащению горнорудного сырья, что может приводить к загрязнению нетипичными для данной геохимической провинции элементами из-за примесей, технологических реагентов и побочных продуктов переработки [64], которые переносятся по ущелью с горно-долинными ветрами. Для Зайлийского Алатау (рис. 6, справа) корреляция между тяжелыми металлами менее выражена и характерна для пар отдельных элементов (например, $r_{\text{Ni-Cd}} = 0,89$, $p < 0,001$; $r_{\text{Cu-Pb}} = 0,87$, $p < 0,001$), что косвенно указывает на большую роль дальнего атмосферного привноса элементов из различных промышленных районов с разной специализацией в зависимости от направления атмосферных потоков, что было установлено ранее [59].

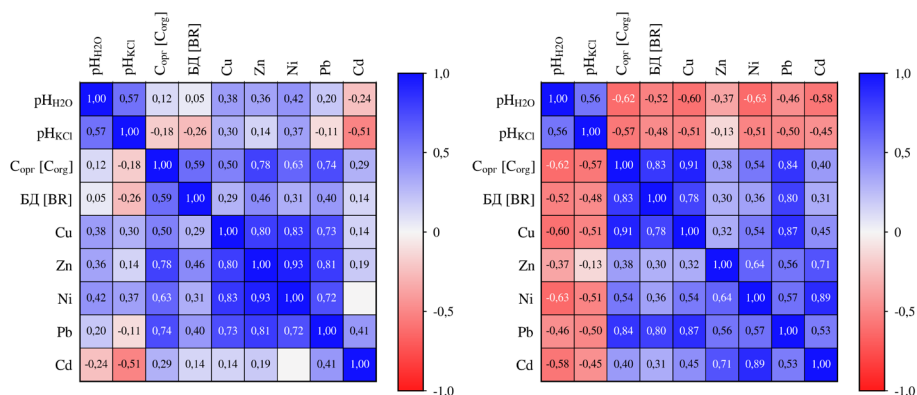


Рис. 6. Корреляционная матрица полученных значений в Приэльбрусье (слева) и Зайлийском Алатау (справа)

[Fig. 6. Correlation matrix of the data obtained for the Elbrus area (left part) and Trans-Ile Alatau (right part)]

В ранее проведенном геохимическом исследовании северной части Заилийского Алатау вблизи г. Алматы [65] также отмечается, что гранит-гнейсовая литология, характерная для данного региона, а также локальные включения других минералов не могут быть источником существенного накопления таких элементов, как Cu, Zn, Ni, Pb и Cd, а увеличение их концентраций, в особенности свинца, авторы этого и другого исследования в районе Тянь-Шаня [66] связывают с антропогенными источниками, в частности с производством и использованием бензина, в том числе этилированного.

Другой наблюдаемой особенностью как в Приэльбрусье, так и в Заилийском Алатау являются высокие значения положительной корреляции между содержанием большинства тяжелых металлов и содержанием углерода органических соединений. Это объясняется тем, что органическое вещество имеет высокую сорбционную способность, связывая ионы тяжёлых металлов посредством комплексообразования с функциональными группами органических соединений, что препятствует их миграции и выносу из почвенного слоя [67]. Среди обнаруженных различий следует отметить преимущественно незначительную корреляцию между значениями pH и содержанием тяжелых металлов в Приэльбрусье (например, $r_{\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{Cu}} = 0,38$; $r_{\text{pH}_{\text{KCl}}/\text{Cu}} = 0,30$). При этом в Заилийском Алатау отмечается преимущественно умеренная отрицательная корреляция между этими значениями (например, $r_{\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{Cu}} = -0,60$; $r_{\text{pH}_{\text{KCl}}/\text{Cu}} = -0,51$). Такое различие может объясняться как локальными геохимическими и гидрологическими характеристиками территории, так и антропогенной деятельностью. В частности, для г. Алматы характерно использование угля в качестве источника энергии, что совместно с работой промышленных предприятий и использованием автотранспорта вызывает повышенную кислотность атмосферных осадков с присутствием загрязненных частиц, что может приводить к снижению значений pH почвенной среды совместно с увеличением ее загрязнения [68], так как поллютанты поступают в высокогорья с горно-долинной атмосферной циркуляцией [36].

Для корректной интерпретации полученных результатов с учетом локальных геохимических особенностей территорий были рассчитаны комплексные индексы загрязнения (рис. 7). Значения индекса Z_c ниже нуля были выявлены в криоконитах ледников Малый Азау и Шхельда, а также в почвах ущелья Терскол, что указывает на отсутствие в них загрязнения, которое было ниже фоновых территорий.

Криокониты с трех других ледников характеризовались схожими значениями Z_c и не превышали низкий уровень загрязнения ($Z_c < 16$). Почвы Заилийского Алатау были больше загрязнены тяжелыми металлами, в особенности Левое Талгарское ущелье, чем почвы Приэльбрусья, однако все образцы также характеризовались отсутствием или слабым загрязнением.

Следует отметить, что индекс Z_c отражает общую степень загрязнения всеми тяжелыми металлами, тогда как для детального понимания негативного воздействия на экосистемы и оценки потенциальных рисков следует также обращать внимание на накопление отдельных элементов.

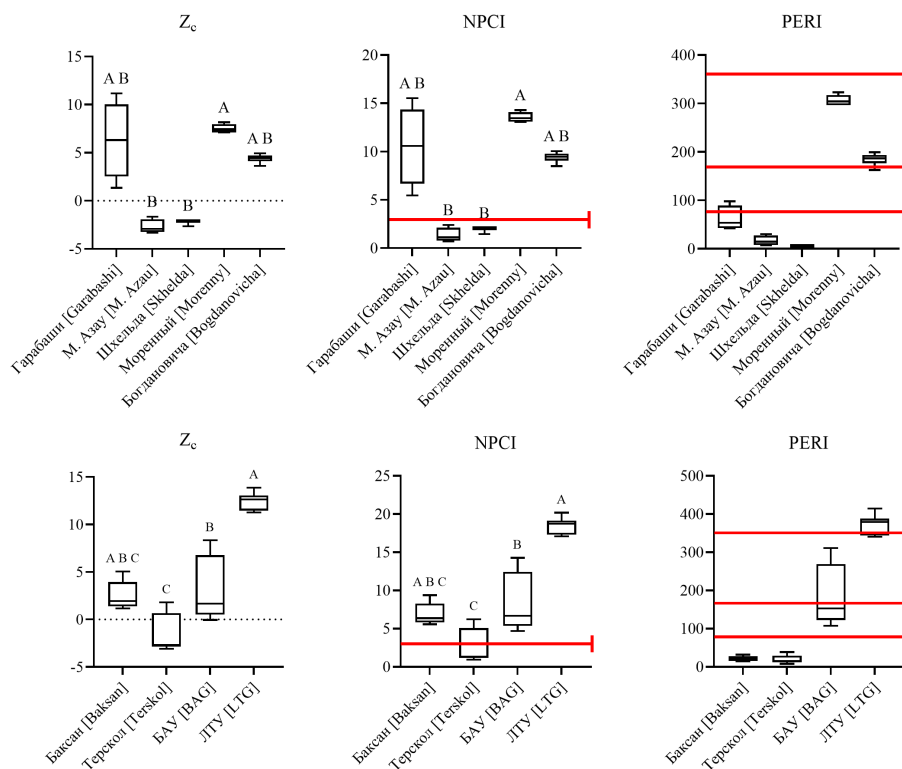


Рис. 7. Значения суммарного показателя загрязнения почв (Z_c), индекса загрязнения Немерова ($NPCI$) и индекса экологического риска ($PERI$), рассчитанные для исследуемых ледников (сверху) и почв ущелий (снизу). А, В, С – группы значимости. Красные линии указывают на границы уровней загрязнения [Fig. 7. Values of the total soil pollution index (Z_c), the Nemerov pollution index ($NPCI$) and the environmental risk index ($PERI$) calculated for the studied cryoconites (top) and gorges (bottom). A, B, C - letter-based significance groups. The red lines indicate threshold of the pollution levels]

Индекс Немерова ($NPCI$), который фокусируется как на общей оценке загрязнения, так и на влиянии элемента с наибольшим коэффициентом концентрации, имеет схожую динамику с индексом Z_c . Согласно расчетам, для криоконитов с ледников Малый Азау и Шхельда характерно отсутствие загрязнения ($NPCI < 3$), в то время как для ледников Гарабаша, Моренный и Богдановича, а также для всех изученных почв возможны риски, связанные с загрязнением территорий. Ранее проведенное исследование на северо-востоке Тянь-Шаня [59] указывало на роль атмосферного привноса поллютантов из промышленных районов Азии, в особенности свинца и кадмия, в увеличении коэффициентов концентрации тяжелых металлов в высокогорных экосистемах, что отмечается и в нашем исследовании.

Наибольшие различия между территориями исследования были выявлены при расчете индекса экологического риска ($PERI$). В то время как все участки в Приэльбрусье характеризовались безопасным для экосистем уровнем содержания тяжелых металлов ($PERI < 90$), включая большинство

образцов с ледника Гарабаши, в криоконитах с ледников Моренный и Богдановича эти значения были на уровне высокого риска для экосистем ($180 \leq PERI < 360$). В почвах БАУ значения экологического риска варьировали от умеренного до высокого, а для почв Левого Талгарского ущелья был характерен крайне высокий уровень экологического риска ($360 \leq PERI$). Такие значения объясняются накоплением кадмия в изучаемых образцах, который обладает высокой токсичностью для биологических объектов. Существенно более высокие концентрации по сравнению с фоновыми значениями не могут быть объяснены только естественными геохимическими факторами и предположительно связаны с атмосферным переносом поллютантов из промышленно-развитых территорий и локальной антропогенной активностью, что обсуждалось ранее. Предыдущие исследования [69, 70] индекса экологического риска в высокогорных территориях Центральной Азии также отмечают доминирующую роль кадмия в загрязнении перигляциальных экосистем, присутствие которого увеличивает значения *PERI* до уровня очень высокого риска для экосистем. Поступление и накопление кадмия, согласно выводам авторов, связано как с естественными геохимическими аномалиями, так и с антропогенными факторами, преимущественно с использованием удобрений и пестицидов в сельском хозяйстве, выбросами предприятий различных производственных сфер в различных локациях с последующим атмосферным переносом аэрозолей и мелкодисперсных фракций. Кроме того, по данным предыдущего исследования в регионе Тянь-Шаня с применением PMF-моделирования [66], загрязнение горных почв кадмием связано не только с атмосферным переносом поллютантов, но и с локальным присутствием отходов продуктов электроники (батарейки, дисплеи, аккумуляторы и пр.) вследствие активной туристско-рекреационной деятельности. При длительном пребывании в почвах, водах или снегу происходит выщелачивание кадмия и его перенос в верхние горизонты почв как непосредственно в форме Cd^{2+} , так и в форме хлоридных и сульфатных комплексов (например $CdCl$, $CdCl_2$, $CdSO_4$) [71].

Следует отметить, что значения индекса *PERI* в криоконитах с ледника Гарабаши и Моренный были выше, чем в почвах прилегающих ущелий, что указывает на высокую сорбционную способность криоконитов и их возможность выступать источником экотоксикантов для перигляциальных зон. На фоне активной дегляциации и антропогенной деятельности это приобретает особую значимость. Так, в ледниковой системе Эльбруса площадь оледенения сократилась на 10,8% с 1997 по 2017 г. [72], а в Заилийском Алатау вблизи г. Алматы в среднем более чем на 32% за вторую половину XX в. [73], что обуславливает расширение перигляциальных зон и формирование новых экосистем на данных территориях. При этом, по ранее полученным данным [74, 75], криокониты непосредственно участвуют в формировании как минимум 13% ледникового стока в период абляции, являясь источником различных элементов для перигляциальных зон, а также активно вовлекаясь в почвообразование на постгляциальных участ-

ках [6]. Учитывая все вышесказанное, а также высокую токсичность тяжелых металлов для живых организмов, следует проводить регулярный мониторинг их содержания в природных водах и почвах высокогорных областей. Несмотря на низкую вероятность токсического воздействия переносимых металлов на экосистемы, в связи с эффектом разбавления из-за поступления большого количества талой воды и сорбционной способностью почвенного органического вещества [76], для уточнения степени риска в будущих исследованиях следует сосредоточиться на рисках для отдельных составляющих высокогорных экосистем, например, на скорости поглощения тяжелых металлов растениями и их влиянии на продуктивность растительных сообществ. Это особенно важно в связи с использованием перигляциальных почв местным населением для ведения сельского хозяйства, преимущественно выпаса скота, и возможным фитотоксическим влиянием тяжелых металлов с дальнейшим переносом элементов по трофическим цепям. Высокие и очень высокие результаты индекса *PERI* в Заилийском Алатау подчеркивают необходимость регулярного мониторинга экотоксикологического состояния этой территории, в особенности загрязнения кадмием, и безопасности продукции сельского хозяйства. При этом ранее было установлено [71], что пороговым содержанием кадмия в почвах, выше которого происходит его аккумуляция и перенос по трофическим цепям, является 3 мг/кг. Все исследуемые нами образцы криоконитов и почв Заилийского Алатау характеризовались существенно более низкой концентрацией кадмия (макс. 1,06 мг/кг), что совместно с низкими значениями индекса Z_c позволяет говорить о безопасности ведения сельскохозяйственной деятельности на данной территории при условии регулярного экотоксикологического мониторинга и смены участков выпаса. Кроме того, несмотря на низкий уровень экологического риска в Приэльбрусье, предыдущие исследования загрязнения криоконитов и почв Кавказского хребта [10, 77] указывают на существенное повышение содержания тяжелых металлов и индекса экологического риска вблизи участков антропогенной деятельности, что следует учитывать при расширении туристической, промышленной и сельскохозяйственной деятельности в Приэльбрусье.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить особенности биогеохимических характеристик и экотоксикологического состояния криоконитов и перигляциальных почв Приэльбрусья и Заилийского Алатау. Подтверждена ключевая роль криоконитов как биогеохимических «горячих точек» на поверхности ледников, характеризующихся значительной микробиологической активностью и способностью к аккумуляции различных элементов. В обоих регионах исследования выявлена сильная положительная корреляция между содержанием органического углерода и тяжелых металлов, что подчеркивает важную роль органического вещества почв и криокони-

тов как естественного барьера благодаря «связыванию» ионов тяжелых металлов посредством комплексообразования. В Приэльбрусье основным источником загрязнения тяжелыми металлами, в особенности медью, цинком и свинцом, является локальная антропогенная деятельность, в первую очередь туризм вблизи ледника Гарабаши, а также хвостохранилище в Баксанском ущелье и дальний атмосферный перенос загрязненных частиц. Несмотря на это, комплексные индексы загрязнения (Z_c , $NCPI$) и экологического риска ($PERI$) указывают на преимущественно низкий уровень угрозы для экосистем в данном регионе. В отличие от Приэльбрусья, для Заилийского Алатау характерен высокий и чрезвычайно высокий уровень экологического риска, что обусловлено накоплением кадмия. Его источники связаны с комбинацией дальнего атмосферного переноса из промышленных районов и локальной антропогенной нагрузки. Наибольшее загрязнение почв отмечено в Левом Талгарском ущелье, что связано с его непосредственной близостью к туристической инфраструктуре. Несмотря на то, что текущие концентрации кадмия не превышают пороговых значений для его передачи по трофическим цепям, тенденция к его накоплению требует пристального внимания. Дальнейшие исследования смогут расширить понимание фитотоксичности тяжелых металлов и их трансформации в звеньях пищевых цепей высокогорных экосистем.

Список источников

1. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»». [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения 10 апреля 2026).
2. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник. М. : Мысль, 1990. 637 с.
3. Баделгажы Е., Капсалямов Б.А., Онерхан Г. Природное очищение почв, загрязненных тяжелыми металлами под влиянием туризма в Алтайских хребтах // *Eurasian Journal of Ecology*. 2025. Т. 82, № 1. С. 18–28. doi: 10.26577/EJE202582102
4. Nordenskjöld A.E. Nordenskjöld's Greenland Expedition // *Nature*. 1883. Vol. 29, № 732. PP. 9–42. doi: 10.1038/029039a
5. Глазовская М.А. Эоловые мелкоземистые накопления на ледниках хребта Терской Ала-Тау // *Труды Института географии АН СССР*. 1952. Вып. 49. С. 55–69.
6. Зазовская Э.П., Мергелов Н.С., Шишков В.А., Долгих А.В., Добрянский А.С., Лебедева М.П., Турчинская С.М., Горячкин С.В. Криокониты как факторы развития почв в условиях быстрого отступления ледника Альдегонда, Западный Шпицберген // *Почвоведение*. 2022. № 3. С. 281–295. doi: 10.31857/S0032180X22030157
7. Kwon H., Jung J.Y., Kim O-S., Laffly D., Lim H.S., Lee Y.K. Soil development and bacterial community shifts along the chronosequence of the Midtre Lovénbreen glacier foreland in Svalbard // *Journal of Ecology and Environment*. 2015. Vol. 38. PP. 461–476. doi: 10.5141/ecoenv.2015.049
8. Poniecka E.A., Bagshaw E.A., Sass H., Segar A., Webster G., Williamson C., Anesio A.M., Tranter M. Physiological capabilities of cryoconite hole microorganisms // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. 1783. doi: 10.3389/fmicb.2020.01783

9. Anesio A., Hodson A., Fritz A., Psenner R., Sattler B. High microbial activity on glaciers: Importance to the global carbon cycle // *Global Change Biology*. 2009. Vol. 15. PP. 955–960. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01758.x
10. Kushnov I., Abakumov E., Tembotov R., Nizamutdinov T. Migration of organic carbon and trace elements in the system glacier-soil in the Central Caucasus alpine environment // *Journal of Mountain Science*. 2022. Vol. 19, № 12. PP. 3458–3474. doi: 10.1007/s11629-022-7589-x
11. Rozwalak P., Podkowa P., Buda J., Niedzielski P., Kawecki S., Ambrosini R., Azzoni R.S., Baccolo G., Ceballos J.L., Cook J., Di Mauro B., Ficetola G.F., Franzetti A., Ignatiuk D., Klimaszyk P., Łokas E., Ono M., Parnikoza I., Pietryka M., Pittino F., Poniecka E., Porazinska D.L., Richter D., Schmidt S.K., Sommers P., Souza-Kasprzyk J., Stibal M., Szczuciński W., Uetake J., Wejnerowski Ł., Yde J.C., Takeuchi N., Zawierucha K. Cryoconite – From minerals and organic matter to bioengineered sediments on glacier's surfaces // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 807. 150874. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150874
12. Abakumov E., Tembotov R., Polyakov V., Ivanov M., Mavlyudov B., Kushnov I., Nizamutdinov T., Yaneva R., Zhiyanski M. Concentration of trace elements in cryoconites of mountain and polar regions of the world // *Geosciences*. 2023. Vol. 13, № 6. 188. doi: 10.3390/geosciences13060188
13. Goelles T., Boggild C.E. Albedo reduction of ice caused by dust and black carbon accumulation: A model applied to the K-transect, West Greenland // *Journal of Glaciology*. 2017. Vol. 63, № 242. PP. 1063–1076. doi: 10.1017/jog.2017.74
14. Kutuzov S., Shahgedanova M., Krupskaya V., Goryachkin S. Optical, geochemical and mineralogical characteristics of light-absorbing impurities deposited on Djankuat Glacier in the Caucasus Mountains // *Water*. 2021. Vol. 13, № 21. 2993. doi: 10.3390/w13212993
15. Shahgedanova M., Kutuzov S., White K.H., Nosenko G. Using the significant dust deposition event on the glaciers of Mt. Elbrus, Caucasus Mountains, Russia on 5 May 2009 to develop a method for dating and "provenancing" of desert dust events recorded in snow pack // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013. Vol. 13, № 4. PP. 1797–1808. doi: 10.5194/acp-13-1797-2013
16. Wei T., Dong Z., Kang S., Zong C., Rostami M., Shao Y. Atmospheric deposition and contamination of trace elements in snowpacks of mountain glaciers in the northeastern Tibetan Plateau // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 689. PP. 754–764. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.455
17. Zou X., Hou S., Wu S., Zhang W., Liu K., Yu J., Liu Y., Pang H. An assessment of natural and anthropogenic trace elements in the atmospheric deposition during 1776–2004 A.D. using the Miaoergou ice core, eastern Tien Shan, China // *Atmospheric Environment*. 2020. Vol. 221. 117112. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117112
18. Nagatsuka N., Takeuchi N., Nakano T., Shin K., Kokado E. Geographical variations in Sr and Nd isotopic ratios of cryoconite on Asian glaciers // *Environmental Research Letters*. 2014. Vol. 9, № 4. 045007. doi: 10.1088/1748-9326/9/4/045007
19. Abakumov E., Nizamutdinov T., Polyakov V. Analysis of the polydispersity of soil-like bodies in glacier environments by the laser light scattering (diffraction) method // *Biological Communications*. 2021. Vol. 66, № 3. PP. 198–209. doi: 10.21638/spbu03.2021.302
20. Abakumov E., Tembotov R. Agriculture in the Baksan Gorge of the Central Caucasus, Kabardino-Balkaria, Russia // *Foods and Raw Materials*. 2023. Vol. 11. PP. 129–140. doi: 10.21603/2308-4057-2023-1-561
21. Ердавлетов С.Р., Алиева Ж.Н., Актымбаева А.С. Перспективы развития и пространственной организации агротуризма в Алматинской области Республики Казахстан // *Научный результат Технологии бизнеса и сервиса*. 2017. Т. 3, № 3. С. 12–19. doi: 10.18413/2408-9346-2017-3-3-11-18

22. Yang J., Xu H., Wang X. Impact of tourism activities on the distribution and pollution of soil heavy metals in natural scenic spots on the northern slope of Tianshan Mountain // PLOS ONE. 2022. Vol. 17, № 7. e0267829. doi: 10.1371/journal.pone.0267829
23. Tashilova A.A., Ashabokov B.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Analysis of climate change in the Caucasus region: End of the 20th – beginning of the 21st century // Climate. 2019. Vol. 7, № 1. 11. doi: 10.3390/cli7010011
24. Разумов В.В. Географические аспекты изучения потенциальных источников чрезвычайных ситуаций природного, техногенного, военного и биологического характера (на примере республик Северного Кавказа) : дис. ... докт. геогр. наук. Нальчик : Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2002. 794 с.
25. Цепкова Н.Л., Пшегусов Р.Х., Ханов З.М., Жашуев А.Ж. Оценка распространения травяных сообществ на основе данных дистанционного зондирования в мониторинге состояния горных лугов Центрального Кавказа (Кабардино-Балкария) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, № 4 (2). С. 428–432.
26. Почвы Кабардино-Балкарской АССР и рекомендации по их использованию. Нальчик : Государственный проектный институт по землеустройству СевКавНИИгипрозем, 1984. 201 с.
27. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Гурбанова О.А. Умеренно щелочные андезибазальты и андезиты Эльбрусского вулканического района (Северный Кавказ): вопросы петрогенезиса, геодинамической типизации и геохимической специализации // Геология и геофизика Юга России. 2019. Т. 9, № 2. С. 40–55. doi: 10.23671/VNC.2019.2.31976
28. Шишов Л., Тонконогов В., Лебедева И., Герасимова М. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 341 с.
29. Дроздов Е.Д., Торопов П.А., Авилов В.К., Артамонов А.Ю., Полухов А.А., Железнова И.В., Ярынич Ю.И. Метеорологический режим высокогорной зоны Эльбруса в период аккумуляции // Лёд и снег. 2024. Т. 64, № 1. С. 25–40. doi: 10.31857/S2076673424010022
30. Слонов Т.Л., Хажуева С.В., Дауров А.А. Редкие виды лишайников на территории национального парка «Приэльбрусье» Кабардино-Балкарской Республики // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2025. Т. 19, № 4. С. 223–226. doi: 10.24412/2072-8816-2025-19-4-223-226
31. Торопов П.А., Шестакова А.А., Полухов А.А., Семенова А.А., Михаленко В.Н. Особенности летнего метеорологического режима Западного плато Эльбруса // Лед и снег. 2020. Т. 60, № 1. С. 58–76. doi: 10.31857/S2076673420010023
32. Лаврусевич А.А., Хоменко В.П., Лаврусевич И.А. Некоторые геоэкологические аспекты формирования селевых потоков бассейнов рек Большая и Малая Алматинка // Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории Земли: материалы науч. конф. Москва : Изд-во МИСИ – МГСУ, 2023. С. 6–12.
33. Akhmetova S., Polyakova S., Duskayev K., Chigrinets A. Water resources and regional climate change: Almaty metropolitan case // Central Asian Journal of Sustainability and Climate Research. 2023. Vol. 2, № 2. PP. 69–84. doi: 10.29258/CAJSCR/2023-R1.v2-2/69-84.eng
34. Dimeyeva L., Sitpayeva G., Sultanova B.M., Ussen K., Islamgulova A. High-altitude flora and vegetation of Kazakhstan and climate change impacts. Cham : Springer, 2015. 48 p.
35. Previtali F., Comolli R. Trace elements in soils in the northern and the central Tian-Shan (Kazakhstan-Kyrgyzstan) // Bicoeca Open Archive. 2008. Vol. 113, № 3. PP. 253–268. doi: 10.37040/GEOGRAFIE2008113030253
36. Черноножкина В.В. Анализ природно-климатических особенностей местности, способствующих загрязнению воздушного бассейна г. Алматы // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 1, Ч. 1. С. 73–74.

37. Standard operating procedure for soil organic carbon: Tyurin spectrophotometric method. Rome, Italy : FAO, 2021. 22 p.
38. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. Вып. 11. С. 1327–1333.
39. ISO 11047. Soil quality – Determination of cadmium, chromium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel and zinc in aqua regia extracts of soil – Flame and electrothermal atomic absorption spectrometric methods. Geneva, Switzerland : International Organization for Standardization, 1998. 18 p.
40. Qingjie G., Jun D., Yunchuan X., Qingfei W., Liqiang Y. Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing // Journal of China University of Geosciences. 2008. Vol. 19, № 3. PP. 230–241. doi: 10.1016/S1002-0705(08)60042-4
41. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach // Water Research. 1980. Vol. 14. PP. 975–1001. doi: 10.1016/0043-1354(80)90143-8
42. Reimann C., de Caritat P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: Regional geochemical surveys versus enrichment factors // Science of the Total Environment. 2005. Vol. 337, № 1. PP. 91–107. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.06.011
43. Дегтярева Т.В., Мельничук В.В., Караев Ю.И. Закономерности формирования микроэлементного состава горно-лесных почв Западного Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12, № 2 (44). С. 211–220. doi: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-211-220
44. Подколзин О.А., Анциферов О.Б. Фоновое содержание тяжелых металлов в почвах Ставропольского края // Агрохимический вестник. 2007. Вып. 6. С. 4–15.
45. Seifina L., Previtali F., Comolli R., Cantelli D., Zdravkovic M. Trace elements in soils in the northern and the central Tian-Shan (Kazakhstan-Kyrgyzstan) // Geografie. 2008. Vol. 113, № 3. PP. 253–268. doi: 10.37040/geografie2008113030253
46. Telling J., Anesio A.M., Tranter M., Stibal M., Hawkings J., Irvine-Fynn T., Hodson A., Butler C., Yallop M., Wadham J. Controls on the autochthonous production and respiration of organic matter in cryoconite holes on high Arctic glaciers // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2012. Vol. 117. G01017. doi: 10.1029/2011JG001828
47. Mangral Z.A., Islam S.U., Tariq L., Kaur S., Ahmad R., Malik A.H., Goel S., Baishya R., Barik S.K., Dar T.U.H. Altitudinal gradient drives significant changes in soil physico-chemical and eco-physiological properties of Rhododendron anthopogon: A case study from Himalaya // Frontiers in Forests and Global Change. 2023. Vol. 6. 1181299. doi: 10.3389/ffgc.2023.1181299
48. Zhongsheng Z., Shan J., Wenwen Z., Qiang G., Haitao W. Which is more important in stabilizing soil organic carbon in mountain ecosystems: molecular features, mineral protection, soil nutrients, or elevation? // Catena. 2023. Vol. 232. 107395. doi: 10.1016/j.catena.2023.107395
49. Mamedov G.S., Shabanov J.A., Kholina T.A. Ecological assessment of soils in high-mountain landscapes of northeastern part of the Greater Caucasus (Azerbaijan) // Eurasian Soil Science. 2017. Vol. 50, № 5. PP. 630–645. doi: 10.1134/S1064229317050118
50. Рототаева О.В., Носенко Г.А., Керимов А.М., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Никитин С.А., Керимов А.А., Тарасова Л.Н. Изменения баланса массы ледника Гарабаш (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв // Лёд и снег. 2019. Т. 59, № 1. С. 5–22. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-5-22
51. Бортников Н.С., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Гурбанов А.Г., Газеев В.М., Докучаев А.Я., Лексин А.Б., Шаззо Ю.К., Цуканова Л.Е., Шевченко А.В. Захороненные промышленные отходы Тырныаузского вольфрамово-молибденового комбината // Вестник Владикавказского научного центра. 2013. Т. 13, № 1. С. 41–53.

52. Кокоев М. Проблема хвостохранилищ ТВМК и возможное их влияние на биогеохимическое состояние воды и почв в Приэльбрусье // Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика: материалы науч. конф. Грозный : АЛЕФ, 2021. С. 120–124.
53. Barros A., Aschero V., Mazzolari A., Cavieres L.A., Pickering C.M. Going off trails: How dispersed visitor use affects alpine vegetation // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 267. 110546. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110546
54. Miśkowiec P. The impact of the mountain barrier on the spread of heavy metal pollution on the example of Gorce Mountains, Southern Poland // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. Vol. 194, № 9. 663. doi: 10.1007/s10661-022-10316-0
55. Zeng T., Ma L., Li Y., Abuduwaili J., Liu W., Feng S. Source apportionment of soil heavy metals with PMF model and Pb isotopes in an intermountain basin of Tianshan Mountains, China // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, № 1. 19429. doi: 10.1038/s41598-022-24064-1
56. Cherkasova A.A., Iurmanov A.A., Kokane P., Maslakov A.A., Petkovich M., Petrushina M.N., Tabelinova A., Tolipov A., Yakubov G., Yushina Y. Prielbrusye national park environmental changes due to increasing tourism activity // *Geography, Environment, Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 4. PP. 115–123.
57. Кутузов С.С., Михаленко В.Н., Шахгеданова М., Жино П., Козачек А.В., Лаврентьев И.И., Кудерина Т.М., Попов Г.В. Пути дальнего переноса пыли на ледники Кавказа и химический состав снега на Западном плато Эльбруса // *Лёд и снег*. 2015. Т. 54, № 3. С. 5–15. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-293-306
58. Kutuzov S., Legrand M., Preunkert S., Ginot P., Mikhailenko V., Shukurov K., Poliuikhov A., Toropov P. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record – Part 2: History of desert dust deposition // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 19, № 22. PP. 14133–14148. doi: 10.5194/acp-19-14133-2019
59. Liu Y., Hou S., Hong S., Hur S.D., Lee K., Wang Y. High-resolution trace element records of an ice core from the eastern Tien Shan, central Asia, since 1953 AD // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2011. Vol. 116, D12307. 116. doi: 10.1029/2010JD015191
60. Wu G., Zhang C., Zhang X., Xu T., Yan N., Gao S. The environmental implications for dust in high-alpine snow and ice cores in Asian mountains // *Global and Planetary Change*. 2015. Vol. 124. PP. 22–29. doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.11.007
61. Евсеев А.А. Атлас мира для минералога. Рос. акад. наук, Минерал. музей им. А.Е. Ферсмана. М. : Ассоциация Экоост, 2004. 284 с.
62. Baubekova A., Akindykova A., Mamirova A., Dumat C., Jurjanz S. Evaluation of environmental contamination by toxic trace elements in Kazakhstan based on reviews of available scientific data // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, № 32. PP. 43315–43328. doi: 10.1007/s11356-021-14979-z
63. Badyelgajy Y., Onerkhan G., Kapsalyamov B., Saspugayeva G., Durmekbayeva S.N. Damage of soil cover due to the impact of tourism in the Altai mountains // *Eurasian Journal of Ecology*. 2022. Vol. 73, № 4. PP. 37–49. doi: 10.26577/EJE.2022.v73.i4.04
64. Mees F., Masalehdani M.N.N., De Putter T., D'Hollander C., Van Biezen E., Muji-nya B.B., Potdevin J.L., Van Ranst E. Concentrations and forms of heavy metals around two ore processing sites in Katanga, Democratic Republic of Congo // *Journal of African Earth Sciences*. 2013. Vol. 77. PP. 22–30. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2012.09.008
65. Yapiyev V., Wade A.J., Shahgedanova M., Saidaliyeva Z., Madibekov A., Severskiy I. The hydrochemistry and water quality of glacierized catchments in Central Asia: A review of the current status and anticipated change // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021. Vol. 38. 100960. doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100960
66. Zeng T., Ma L., Li Y., Abuduwaili J., Liu W., Feng S. Source apportionment of soil heavy metals with PMF model and Pb isotopes in an intermountain basin of Tianshan Mountains, China // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, № 1. 19429. doi: 10.1038/s41598-022-24064-1

67. Добровольский В.В. Роль органического вещества почв в миграции тяжелых металлов // Природа. 2004. № 7. С. 35–39.
68. Aiman N., Gulnaz S., Alena M. The characteristics of pollution in the big industrial cities of Kazakhstan by the example of Almaty // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2018. Vol. 16, № 1. PP. 81–98. doi: 10.1007/s40201-018-0299-1
69. Zhang Y., Miao G., Ma Q., Niu Y., Zhu Q., Ke X. Cumulative characteristics and ecological risk source analysis of soil potentially toxic elements in the northern margin of the Tibetan Plateau // Environmental Geochemistry and Health. 2024. Vol. 46, № 9. 351. doi: 10.1007/s10653-024-02138-5
70. Xu M., Sun W., Wang R. Spatial distribution and ecological risk assessment of potentially harmful trace elements in surface sediments from Lake Dali, North China // Water. 2019. Vol. 11, № 12. 2544. doi: 10.3390/w11122544
71. Kubier A., Wilkin R.T., Pichler T. Cadmium in soils and groundwater: A review // Applied Geochemistry. 2019. Vol. 108. 104388. doi: 10.1016/j.apgeochem.2019.104388
72. Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017 // Frontiers in Earth Science. 2019. Vol. 7. 153. doi: 10.3389/feart.2019.00153
73. Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data // Global and Planetary Change. 2007. Vol. 56, № 1–2. PP. 1–12. doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.009
74. Fountain A.G., Tranter M., Nylen T.H., Lewis K.J., Mueller D.R. Evolution of cryoconite holes and their contribution to meltwater runoff from glaciers in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica // Journal of Glaciology. 2004. Vol. 50, № 168. PP. 35–45. doi: 10.3189/172756504781830312
75. Fortner S.K., Lyons W.B. Dissolved trace and minor elements in cryoconite holes and supraglacial streams, Canada Glacier, Antarctica // Frontiers in Earth Science. 2018. Vol. 6. 31. doi: 10.3389/feart.2018.00031
76. Bing H., Wu Y., Zhou J., Liang J., Wang J., Yang Z. Mobility and eco-risk of trace metals in soils at the Hailuoguo Glacier foreland in eastern Tibetan Plateau // Environmental Science and Pollution Research. 2016. Vol. 23, № 6. PP. 5721–5732. doi: 10.1007/s11356-015-5592-2
77. Kashirina E., Gorbunov R., Kerimov I., Gorbunova T., Drygval P., Chuprina E., Nikiforova A., Lineva N., Drygval A., Kelip A., Pham C.N., Bratanov N. Spatial distribution of geochemical anomalies in soils of river basins of the Northeastern Caucasus // Geosciences. 2025. Vol. 15, № 10. 380. doi: 10.3390/geosciences15100380

References

1. Resolution No. 2 of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021 “Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm [On Approval of sanitary rules and Regulations]” SanPiN 1.2.3685-21 “Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]”. [Electronic resource]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (accessed 10.04.2026). In Russian
2. Reimers NF. Prirodopol'zovanie: Slovar'-spravochnik [Nature Management: Dictionary-Handbook]. Moscow: Mysl' Publ.; 1990. 637 p. In Russian
3. Badyelgay Y, Kapsalyamov BA, Onerkhan G. Natural remediation of soil contaminated with heavy metals due to tourism in the Altai mountains. *Eurasian Journal of Ecology*. 2025;82(1):18–28. In Kazakh, English summary. doi: 10.26577/EJE202582102
4. Nordenskjöld AE. Nordenskjöld's Greenland Expedition. *Nature*. 1883;29(732):9–42. doi: 10.1038/029039a

5. Glazovskaya MA. Eolovye melkozemistye nakopleniya na lednikakh khrebta Terskey Ala-Tau [Aeolian silty accumulations on the glaciers of the Terskey Ala-Tau Range]. *Trudy Instituta geografii AN SSSR*. 1952;49:55-69. In Russian
6. Zazovskaya EP, Mergelov NS, Shishkov VA, Dolgikh AV, Dobryansky AS, Lebedeva MP, Turchinskaya SM, Goryachkin SV. Cryoconites as factors of soil development in conditions of rapid retreat of the Aldegonda Glacier, Western Svalbard. *Eurasian Soil Science*. 2022;55(3):299-312. doi: 10.1134/S1064229322030152
7. Kwon H, Jung JY, Kim O-S, Laffly D, Lim HS, Lee YK. Soil development and bacterial community shifts along the chronosequence of the Midtre Lovénbreen glacier foreland in Svalbard. *Journal of Ecology and Environment*. 2015;38:461-476. doi: 10.5141/ecoenv.2015.049
8. Poniecka EA, Bagshaw EA, Sass H, Segar A, Webster G, Williamson C, Anesio AM, Tranter M. Physiological capabilities of cryoconite hole microorganisms. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11:1783. doi: 10.3389/fmicb.2020.01783
9. Anesio A, Hodson A, Fritz A, Psenner R, Sattler B. High microbial activity on glaciers: Importance to the global carbon cycle. *Global Change Biology*. 2009;15:955-960. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01758.x
10. Kushnov I, Abakumov E, Tembotov R, Nizamutdinov T. Migration of organic carbon and trace elements in the system glacier-soil in the Central Caucasus alpine environment. *Journal of Mountain Science*. 2022;19(12):3458-3474. doi: 10.1007/s11629-022-7589-x
11. Rozwalak P, Podkowa P, Buda J, Niedzielski P, Kawecki S, Ambrosini R, Azzoni RS, Baccolo G, Ceballos JL, Cook J, Di Mauro B, Ficetola GF, Franzetti A, Ignatiuk D, Klimaszuk P, Łokas E, Ono M, Parnikoza I, Pietryka M, Pittino F, Poniecka E, Porazinska DL, Richter D, Schmidt SK, Sommers P, Souza-Kasprzyk J, Stibal M, Szczuciński W, Uetake J, Wejnerowski Ł, Yde JC, Takeuchi N, Zawierucha K. Cryoconite - From minerals and organic matter to bioengineered sediments on glacier's surfaces. *Science of the Total Environment*. 2022;807:150874. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150874
12. Abakumov E, Tembotov R, Polyakov V, Ivanov M, Mavlyudov B, Kushnov I, Nizamutdinov T, Yaneva R, Zhiyanski M. Concentration of trace elements in cryoconites of mountain and polar regions of the world. *Geosciences*. 2023;13(6):188. doi: 10.3390/geosciences13060188
13. Goelles T, Boggild CE. Albedo reduction of ice caused by dust and black carbon accumulation: a model applied to the K-transect, West Greenland. *Journal of Glaciology*. 2017;63(242):1063-1076. doi: 10.1017/jog.2017.74
14. Kutuzov S, Shahgedanova M, Krupskaya V, Goryachkin S. Optical, geochemical and mineralogical characteristics of light-absorbing impurities deposited on Djankuat Glacier in the Caucasus Mountains. *Water*. 2021;13(21):2993. doi: 10.3390/w13212993
15. Shahgedanova M, Kutuzov S, White KH, Nosenko G. Using the significant dust deposition event on the glaciers of Mt. Elbrus, Caucasus Mountains, Russia on 5 May 2009 to develop a method for dating and "provenancing" of desert dust events recorded in snow pack. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013;13(4):1797-1808. doi: 10.5194/acp-13-1797-2013
16. Wei T, Dong Z, Kang S, Zong C, Rostami M, Shao Y. Atmospheric deposition and contamination of trace elements in snowpacks of mountain glaciers in the northeastern Tibetan Plateau. *Science of The Total Environment*. 2019;689:754-764. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.455
17. Zou X, Hou S, Wu S, Zhang W, Liu K, Yu J, Liu Y, Pang H. An assessment of natural and anthropogenic trace elements in the atmospheric deposition during 1776-2004 A.D. using the Miaoergou ice core, eastern Tien Shan, China. *Atmospheric Environment*. 2020;221:117112. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117112
18. Nagatsuka N, Takeuchi N, Nakano T, Shin K, Kokado E. Geographical variations in Sr and Nd isotopic ratios of cryoconite on Asian glaciers. *Environmental Research Letters*. 2014;9(4):045007. doi: 10.1088/1748-9326/9/4/045007

19. Abakumov E, Nizamutdinov T, Polyakov V. Analysis of the polydispersity of soil-like bodies in glacier environments by the laser light scattering (diffraction) method. *Biological Communications*. 2021;66(3):198-209. doi: 10.21638/spbu03.2021.302
20. Abakumov E, Tembotov R. Agriculture in the Baksan Gorge of the Central Caucasus, Kabardino-Balkaria, Russia. *Foods and Raw Materials*. 2023;11:129-140. doi: 10.21603/2308-4057-2023-1-561
21. Yerdavletov SR, Aliyeva ZN, Aktymbaewa AS. Prospects of development and spatial organization for agrotourism in Almaty region of the Republic of Kazakhstan. *Research Result. Business and Service Technologies*. 2017;3(3):12-19. In Russian, English summary. doi: 10.18413/2408-9346-2017-3-3-11-18
22. Yang J, Xu H, Wang X. Impact of tourism activities on the distribution and pollution of soil heavy metals in natural scenic spots on the northern slope of Tianshan Mountain. *PLOS ONE*. 2022;17(7):e0267829. doi: 10.1371/journal.pone.0267829
23. Tashilova AA, Ashabokov BA, Kesheva LA, Teunova NV. Analysis of climate change in the Caucasus region: End of the 20th - beginning of the 21st Century. *Climate*. 2019;7(1):11. doi: 10.3390/cli7010011
24. Razumov VV. *Geograficheskie aspekty izucheniya potentsial'nykh istochnikov chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo, tekhnogenno, voennogo i biologicheskogo kharaktera (na primere respublik Severnogo Kavkaza)* [Geographical aspects of the study of potential sources of emergencies of natural, technogenic, military and biological character (on the example of the republics of the North Caucasus). Dissertation for the degree of Doctor of Geographical Sciences]. Nalchik: Kabardino-Balkarian State University named after Berbekov HM; 2002. 794 p. In Russian
25. Tsepkova NL, Pshegusov RKh, Khanov ZM, Zhashuev AZh. The assessment of herbaceous associations distribution based on the remote sensing data in monitoring the state of mountain meadows in the Central Caucasus (Kabardino-Balkaria). *Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015;17(4(2)):428-432. In Russian, English summary
26. Pochvy Kabardino-Balkarskoy ASSR i rekomendatsii po ikh ispol'zovaniyu [Soils of the Kabardino-Balkarian ASSR and recommendations for their use]. Nalchik: State Design Institute for Land Management SevKavNIigiprozem Publ.; 1984. 201 p. In Russian
27. Gazeev VM, Gurbanov AG, Gurbanova OA. Temperate-alkaline andesibasalts and andesites of the Elbrus volcanic region (Northern Caucasus): questions of petrogenesis, geodynamic typisation and geochemical specialization. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2019;9(2):40-55. In Russian, English summary. doi: 10.23671/VNC.2019.2.31976
28. Shishov L, Tonkonogov V, Lebedeva I, Gerasimova M. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and Diagnostics of Soils of Russia]. Smolensk: Oykumena Publ.; 2004. 341 p. In Russian
29. Drozdov ED, Toropov PA, Avilov VK, Artamonov AY, Polyukhov AA, Zheleznova IV, Yarinich YI. Meteorological regime of the Elbrus high-mountain zone during the accumulation period. *Ice and Snow*. 2024;64(1):25-40. In Russian, English summary. doi: 10.31857/S2076673424010022
30. Slonov TL, Khazhueva SV, Daurov AA. Rare lichen species in the territory of the Elbrus National Park of the Kabardino-Balkarian Republic. *Phytodiversity of Eastern Europe*. 2025;19(4):223-226. In Russian, English summary. doi: 10.24412/2072-8816-2025-19-4-223-226
31. Toropov PA, Shestakova AA, Polyukhov AA, Semenova AA, Mikhaleiko VN. Character of the summer meteorological regime on the Western plateau of Elbrus (the Caucasus). *Ice and Snow*. 2020;60(1):58-76. In Russian, English summary. doi: 10.31857/S2076673420010023
32. Lavrusevich AA, Khomenko VP, Lavrusevich IA. Nekotorye geoeologicheskie aspekty formirovaniya selevykh potokov basseynov rek Bol'shaya i Malaya Almatinka [Some geoeological aspects of debris-flow formation in the basins of the Bolshaya and Malaya

- Almatinka rivers]. In: *Geoekologicheskie problemy tekhnogennoy etapy istorii Zemli. Materialy nauch. konf. [Geoecological problems of technogenic period of the Earth formation. Proc. of the Sci. Conf. (Moscow, Russia, 12-13 October, 2023)]*. Moscow: MISI-MGSU Publ.; 2023. pp. 6-11. In Russian
33. Akhmetova S, Polyakova S, Duskayev K, Chigrinets A. Water resources and regional climate change: Almaty metropolitan case. *Central Asian Journal of Sustainability and Climate Research*. 2023;2(2):69-84. doi: 10.29258/CAJSCR/2023-R1.v2-2/69-84.eng
 34. Dimeyeva L, Sitpayeva G, Sultanova BM, Ussen K, Islamgulova A. High-Altitude Flora and Vegetation of Kazakhstan and Climate Change Impacts. Cham: Springer; 2015. 48 p.
 35. Previtali F, Comolli R. Trace elements in soils in the northern and the central Tian-Shan (Kazakhstan-Kyrgyzstan). *Bicocca Open Archive*. 2008;113(3):253-268. doi: 10.37040/GEOGRAFIE2008113030253
 36. Chernonozhkina VV. Analiz prirodno-klimaticheskikh osobennostey mestnosti, sposobstvuyushchikh zagryazneniyu vozdušnogo basseyna g. Almaty [Analysis of natural and climatic features of the area contributing to air basin pollution in Almaty]. *Mezhdunarodnyy Nauchno-issledovatel'skiy Zhurnal*. 2013;1(1):73-74. In Russian
 37. Standard operating procedure for soil organic carbon: Tyurin spectrophotometric method. Rome, Italy: FAO; 2021. 22 p.
 38. Ananyeva ND, Susyan EA, Gavrilenko EG. Determination of the soil microbial biomass carbon using the method of substrate-induced respiration. *Eurasian Soil Science*. 2011;44(11):1215-1221. doi: 10.1134/S1064229311030021
 39. ISO 11047. Soil quality - Determination of cadmium, chromium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel and zinc in aqua regia extracts of soil - Flame and electrothermal atomic absorption spectrometric methods. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1998. 18 p.
 40. Qingjie G, Jun D, Yunchuan X, Qingfei W, Liqiang Y. Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*. 2008;19(3):230-241. doi: 10.1016/S1002-0705(08)60042-4
 41. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*. 1980;14:975-1001. doi: 10.1016/0043-1354(80)90143-8
 42. Reimann C, de Caritat P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*. 2005;337(1):91-107. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.06.011
 43. Degtyareva TV, Melnichuk VV, Karaev YuI. Regularities of formation of mountain-forest soils' microelement composition of Western Caucasus. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(2(44)):211-220. In Russian, English summary. doi: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-211-220
 44. Podkolzin OA, Antsiferov OB. Fonovoe sodержanie tyazhelykh metallov v pochvakh Stavropol'skogo kraya [Background content of heavy metals in soils of the Stavropol Territory]. *Agrochemical Herald*. 2007;6:4-15. In Russian
 45. Sefrna L, Previtali F, Comolli R, Cantelli D, Zdravkovic M. Trace elements in soils in the northern and the central Tian-Shan (Kazakhstan-Kyrgyzstan). *Geografie*. 2008; 113(3):253-268. doi: 10.37040/geografie2008113030253
 46. Telling J, Anesio AM, Tranter M, Stibal M, Hawkings J, Irvine-Fynn T, Hodson A, Butler C, Yallop M, Wadham J. Controls on the autochthonous production and respiration of organic matter in cryoconite holes on high Arctic glaciers. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2012;117:G01017. doi: 10.1029/2011JG001828
 47. Mangral ZA, Islam SU, Tariq L, Kaur S, Ahmad R, Malik AH, Goel S, Baishya R, Barik SK, Dar TUH. Altitudinal gradient drives significant changes in soil physico-chemical and eco-physiological properties of *Rhododendron anthopogon*: A case study from Himalaya. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2023;6:1181299. doi: 10.3389/ffgc.2023.1181299

48. Zhongsheng Z, Shan J, Wenwen Z, Qiang G, Haitao W. Which is more important in stabilizing soil organic carbon in mountain ecosystems: molecular features, mineral protection, soil nutrients, or elevation? *Catena*. 2023;232:107395. doi: 10.1016/j.catena.2023.107395
49. Mamedov GS, Shabanov JA, Kholina TA. Ecological assessment of soils in high-mountain landscapes of northeastern part of the Greater Caucasus (Azerbaijan). *Eurasian Soil Science*. 2017;50(5):630-645. doi: 10.1134/S1064229317050118
50. Rototaeva OV, Nosenko GA, Kerimov AM, Kutuzov SS, Lavrentiev II, Nikitin SA, Kerimov AA, Tarasova LN. Changes of the mass balance of the Garabashy Glacier, Mount Elbrus, at the turn of 20th and 21st centuries. *Ice and Snow*. 2019;59(1):5-22. In Russian, English summary. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-5-22
51. Bortnikov NS, Bogatikov OA, Karamurзов BS, Gurbanov AG, Gazeev VM, Dokuchaev AY, Leksin AB, Shazzo YK, Tsukanova LE, Shevchenko AV. Zakhoronennye promyshlennye otkhody Tyrnauzskogo vol'framovo-molibdenovogo kombinata [Buried industrial waste of the Tyrnauz tungsten-molybdenum plant]. *Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra*. 2013;13(1):41-53. In Russian
52. Kokoev M. Problema khvostokhranilishch TVMK i vozmozhnoe ikh vliyanie na biogekhimicheskoe sostoyanie vody i pochv v Priel'brus'e [The problem with tailing dumps of Tyrnauz tungsten-molybdenum mining and processing complex and their potential effect on bio- and geochemical condition of water and soils in Elbrus region]. In: *Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki: teoriya, tekhnologiya, metodologiya i praktika*. Materialy nauch. konf. [Topical Issues of Modern Science: Theory, Technology, Methodology and Practice. Proc. of the Sci. Conf. (Grozny, Russia, 28 April, 2021)]. Grozny: GSOTU named after Academician M.D. Millionshchikov Publ.; 2021. pp. 120-124. In Russian
53. Barros A, Aschero V, Mazzolari A, Cavieres LA, Pickering CM. Going off trails: How dispersed visitor use affects alpine vegetation. *Journal of Environmental Management*. 2020;267:110546. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110546
54. Miśkowiec P. The impact of the mountain barrier on the spread of heavy metal pollution on the example of Gorce Mountains, Southern Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022;194(9):663. doi: 10.1007/s10661-022-10316-0
55. Zeng T, Ma L, Li Y, Abuduwaili J, Liu W, Feng S. Source apportionment of soil heavy metals with PMF model and Pb isotopes in an intermountain basin of Tianshan Mountains, China. *Scientific Reports*. 2022;12(1):19429. doi: 10.1038/s41598-022-24064-1
56. Cherkasova AA, Iurmanov AA, Kokane P, Maslakov AA, Petkovich M, Petrushina MN, Tabelinova A, Tolipov A, Yakubov G, Yushina Y. Prielbrusye national park environmental changes due to increasing tourism activity. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023;15(4):115-123. doi: 10.24057/2071-9388-2022-108
57. Kutuzov SS, Mikhalenko VN, Shahgedanova M, Ginot P, Kozachek AV, Lavrentiev II, Kudierina TM, Popov GV. Ways of far-distance dust transport onto Caucasian glaciers and chemical composition of snow on the Western Plateau of Elbrus. *Ice and Snow*. 2015;54(3):5-15. In Russian, English summary. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-293-306
58. Kutuzov S, Legrand M, Preunkert S, Ginot P, Mikhalenko V, Shukurov K, Poliukhov A, Toropov P. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record - Part 2: History of desert dust deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019;19(22):14133-14148. doi: 10.5194/acp-19-14133-2019
59. Liu Y, Hou S, Hong S, Hur SD, Lee K, Wang Y. High-resolution trace element records of an ice core from the eastern Tien Shan, central Asia, since 1953 AD. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2011;116:D12307. doi: 10.1029/2010JD015191
60. Wu G, Zhang C, Zhang X, Xu T, Yan N, Gao S. The environmental implications for dust in high-alpine snow and ice cores in Asian mountains. *Global and Planetary Change*. 2015;124:22-29. doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.11.007
61. Evseev AA. Atlas mira dlya mineraloga [Atlas of the World for a Mineralogist]. Moscow: Assotsiatsiya Ekost Publ.; 2004. 284 p. In Russian

62. Baubekova A, Akindykova A, Mamirova A, Dumat C, Jurjanž S. Evaluation of environmental contamination by toxic trace elements in Kazakhstan based on reviews of available scientific data. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(32):43315-43328. doi: 10.1007/s11356-021-14979-z
63. Badylgajy Y, Onerkhan G, Kapsalyamov B, Saspuğayeva G, Durmekbayeva SN. Damage of soil cover due to the impact of tourism in the Altai mountains. *Eurasian Journal of Ecology*. 2022;73(4):37-49. doi: 10.26577/EJE.2022.v73.i4.04
64. Mees F, Masalehdani MNN, De Putter T, D'Hollander C, Van Biezen E, Mujinya BB, Potdevin JL, Van Ranst E. Concentrations and forms of heavy metals around two ore processing sites in Katanga, Democratic Republic of Congo. *Journal of African Earth Sciences*. 2013;77:22-30. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2012.09.008
65. Yapiyev V, Wade AJ, Shahgedanova M, Saidaliyeva Z, Madibekov A, Severskiy I. The hydrochemistry and water quality of glacierized catchments in Central Asia: A review of the current status and anticipated change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021;38:100960. doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100960
66. Zeng T, Ma L, Li Y, Abuduwaili J, Liu W, Feng S. Source apportionment of soil heavy metals with PMF model and Pb isotopes in an intermountain basin of Tianshan Mountains, China. *Scientific Reports*. 2022;12(1):19429. doi: 10.1038/s41598-022-24064-1
67. Dobrovolsky VV. Rol' organicheskogo veshchestva pochv v migratsii tyazhelykh metallov [The role of soil organic matter in the migration of heavy metals]. *Priroda*. 2004;7:35-39. In Russian
68. Aiman N, Gulnaz S, Alena M. The characteristics of pollution in the big industrial cities of Kazakhstan by the example of Almaty. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2018;16(1):81-98. doi: 10.1007/s40201-018-0299-1
69. Zhang Y, Miao G, Ma Q, Niu Y, Zhu Q, Ke X. Cumulative characteristics and ecological risk source analysis of soil potentially toxic elements in the northern margin of the Tibetan Plateau. *Environmental Geochemistry and Health*. 2024;46(9):351. doi: 10.1007/s10653-024-02138-5
70. Xu M, Sun W, Wang R. Spatial distribution and ecological risk assessment of potentially harmful trace elements in surface sediments from Lake Dali, North China. *Water*. 2019;11(12):2544. doi: 10.3390/w11122544
71. Kubier A, Wilkin RT, Pichler T. Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry*. 2019;108:104388. doi: 10.1016/j.apgeochem.2019.104388
72. Kutuzov S, Lavrentiev I, Smirnov A, Nosenko G, Petrakov D. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017. *Frontiers in Earth Science*. 2019;7:153. doi: 10.3389/feart.2019.00153
73. Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*. 2007;56(1-2):1-12. doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.009
74. Fountain AG, Tranter M, Nylen TH, Lewis KJ, Mueller DR. Evolution of cryoconite holes and their contribution to meltwater runoff from glaciers in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Journal of Glaciology*. 2004;50(168):35-45. doi: 10.3189/172756504781830312
75. Fortner SK, Lyons WB. Dissolved trace and minor elements in cryoconite holes and supraglacial streams, Canada Glacier, Antarctica. *Frontiers in Earth Science*. 2018;6:31. doi: 10.3389/feart.2018.00031
76. Bing H, Wu Y, Zhou J, Liang J, Wang J, Yang Z. Mobility and eco-risk of trace metals in soils at the Hailuoguo Glacier foreland in eastern Tibetan Plateau. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23(6):5721-5732. doi: 10.1007/s11356-015-5592-2
77. Kashirina E, Gorbunov R, Kerimov I, Gorbunova T, Drygval P, Chuprina E, Nikiforova A, Lineva N, Drygval A, Kelip A, Pham CN, Bratanov N. Spatial distribution of geochemical anomalies in soils of river basins of the Northeastern Caucasus. *Geosciences*. 2025;15(10):380. doi: 10.3390/geosciences15100380

Информация об авторах:

Кушнов Иван Денисович, аспирант и инженер-исследователь кафедры прикладной экологии, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8018-7359>

E-mail: st084838@student.spbu.ru

Темботов Рустам Хасанбиевич, канд. биол. наук, с. н. с. лаборатории почвенно-экологических исследований, Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН (Нальчик, Россия); с. н. с. кафедры прикладной экологии, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2342-4653>

E-mail: r.tembotov@spbu.ru

Нехаев Иван Олегович, канд. биол. наук, с. н. с. лаборатории арахнологии и других беспозвоночных, Институт зоологии Республики Казахстан (Алматы, Казахстан); с. н. с. кафедры прикладной экологии, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9464-715X>

E-mail: inekhaev@gmail.com

Низамутдинов Тимур Ильгизович, м. н. с. кафедры прикладной экологии, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2600-5494>

E-mail: t.nizamutdinov@spbu.ru

Абакумов Евгений Васильевич, д-р биол. наук, проф., проф. РАН, и. о. зав. кафедрой прикладной экологии, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия); в. н. с., Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии (Санкт-Петербург, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5248-9018>

E-mail: e.abakumov@spbu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Ivan D. Kushnov, PhD student and engineer-researcher of the Department of Applied Ecology, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8018-7359>

E-mail: st084838@student.spbu.ru

Rustam Kh. Tembotov, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher of the Laboratory of Soil-Environmental Researches, A.K. Tembotov Institute of Ecology of Mountainous Regions RAS (Nalchik, Russian Federation); Senior Researcher of the Department of Applied Ecology, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2342-4653>

E-mail: r.tembotov@spbu.ru

Ivan O. Nekhaev, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher of the Laboratory of Arachnology and Other Invertebrates, Institute of Zoology of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan); Senior Researcher of the Department of Applied Ecology, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9464-715X>

E-mail: inekhaev@gmail.com

Timur I. Nizamutdinov, Junior Researcher of the Department of Applied Ecology, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2600-5494>

E-mail: t.nizamutdinov@spbu.ru

Evgeny E. Abakumov, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Professor of Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Applied Ecology, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation); Leading Researcher at the All-Russia Research Institute of Agricultural Microbiology (St. Petersburg, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5248-9018>

E-mail: e.abakumov@spbu.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 19.11.2025;
одобрена после рецензирования 24.03.2026; принята к публикации 02.09.2026.*

*The article was submitted 19.11.2025;
approved after reviewing 24.03.2026; accepted for publication 02.09.2026.*